

Agriculture et Agroalimentaire Canada

Agriculture and Agri-Food Canada

Direction générale de la recherche

Research Branch

LA SANTÉ DE L'AIR QUE NOUS RESPIRONS

Vers une agriculture durable au Canada

Canada



LA SANTÉ DE L'AIR QUE NOUS RESPIRONS

Vers une agriculture durable au Canada

Compilé et rédigé par

H.H. Janzen
R.L. Desjardins
J.M.R. Asselin
et
B. Grace

Direction générale de la recherche
Agriculture et Agroalimentaire Canada

Pour obtenir un exemplaire, adressez-vous à
Donna Dewan
Agente de publication
Promotion des stratégies
Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Édifice Sir John Carling, pièce 777
Ottawa (Ontario)
K1A OC5
Tél. (613) 759-7787
Téléc. (613) 759-7768
C.É. dewandm@em.agr.ca

La version électronique sera prête en mai 1999, à
www.agr.ca/research/branch

Publication 1981/F
N° de catalogue A53-1981/1998F
ISBN 0-662-83179-9
Impression 1999 0,7M:02/99

This publication is available in English under the title
The health of our air : Towards a sustainable agriculture in Canada

Graphiste

Johanne Sylvestre-Drouin
Promotion des stratégies
Agriculture et Agroalimentaire Canada

Réviseurs

Sharon Rudnitski
Promotion des stratégies
Agriculture et Agroalimentaire Canada

Jane T. Buckley
Gilpen Editing Service

Jacinthe Laferrière
Promotion des stratégies
Agriculture et Agroalimentaire Canada

Table des matières

Avant-propos

Ce n'est qu'au cours des quatre ou cinq dernières décennies que les chercheurs ont réussi à mieux comprendre bon nombre des interactions entre les terres, les océans et l'atmosphère et la façon dont les activités humaines pouvaient influer sur ces échanges. Et ce n'est qu'au cours des vingt dernières années que le public et les gouvernements ont clairement pu se rendre compte de la composition changeante de l'atmosphère planétaire et des effets probables d'une telle variation. C'est l'utilisation, sur une période d'à peine un siècle, de grandes quantités de combustibles fossiles emmagasinés dans le sol au cours de millions d'années qui a eu l'impact le plus important. Toutefois, la manière dont nous gérons les terres et produisons de la nourriture et des fibres n'est sûrement pas négligeable. La pollution atmosphérique touche directement tous les animaux et toutes les plantes terrestres, ainsi que le climat qui régit la productivité, les activités humaines et l'apparition d'évènements catastrophiques comme les sécheresses, les inondations et les orages.

Dans le présent ouvrage, on traite exhaustivement des interactions qui surviennent entre les terres et l'atmosphère en raison des pratiques agricoles au Canada. Certains des changements atmosphériques peuvent être bénins ou même bénéfiques pour les humains et les plantes. Toutefois, nombreuses sont les données indiquant la manifestation d'effets néfastes. Ces effets négatifs seront de plus en plus fréquents, à moins que nous ne changions notre manière de gérer notre énergie, notre nourriture et nos fibres.

Les auteurs du présent ouvrage font justement remarquer que l'émission nette de gaz à effet de serre par le secteur agricole « est normalement un symptôme d'une utilisation inefficace des ressources ». Cette affirmation s'applique aussi aux autres secteurs économiques contribuant aux changements atmosphériques. Les gaz à effet de serre ne sont pas les seuls en cause, mais aussi des substances comme les émissions de précurseurs de l'ozone troposphérique et des pluies acides.

Dans le présent ouvrage, on décrit plusieurs façons permettant d'augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources en agriculture. On y examine aussi la possibilité de restaurer le carbone organique dans les sols par des méthodes culturales de conservation ou par d'autres moyens, ce qui permettrait de réduire la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Puis, on démontre qu'il existe de nombreuses occasions « avantageuses pour tous », dans lesquelles une productivité accrue du secteur agricole et des sols va de pair avec une réduction de la pollution atmosphérique. Une bonne partie de l'information scientifique nécessaire à l'élaboration d'une stratégie efficace pour le secteur agricole canadien est colligée dans cet ouvrage.

Cette façon coopérative d'aborder les problèmes auxquels font face l'agriculture et l'atmosphère du globe deviendra, nous l'espérons, une inspiration pour d'autres secteurs. Tout comme pour l'agriculture, il existe, dans les domaines du transport et de la foresterie, de nombreuses occasions rentables et « avantageuses pour tous » d'atteindre l'efficacité énergétique, qui permettraient d'améliorer la situation économique du Canada tout en protégeant l'atmosphère, essentielle à la vie, dans laquelle baigne notre petite planète.

James P. Bruce, OC, MSRC
Conseil du programme climatologique canadien

Préface

Deux rapports internationaux sont à l'origine du présent ouvrage :

- *Notre avenir à tous*, de la Commission mondiale de l'environnement et du développement, mieux connu comme le rapport « Brundtland »

- le rapport de 1990 du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, GIEC.

En 1987, *Notre avenir à tous* a porté à l'attention du monde des problèmes comme le réchauffement du globe, l'amincissement de la couche d'ozone, la désertification, la réduction de la biodiversité, les demandes émergeantes d'une population en croissance et le besoin d'un échéancier mondial de changements pour assurer un développement durable. En bref, la Commission s'est penchée sur les moyens de satisfaire aux besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs.

Le GIEC, mis sur pied par l'Organisation météorologique mondiale et le programme des Nations Unies pour l'environnement a publié sa première évaluation scientifique en 1990. Plusieurs centaines de chercheurs provenant de 25 pays ont participé à la préparation et à l'examen des données scientifiques. Le GIEC a conclu que les émissions dues à l'activité humaine contribuaient à faire augmenter les concentrations de gaz à effet de serre. Il a averti que ceci pourrait conduire à un réchauffement de la surface terrestre.

Ces deux rapports ont mis l'évolution du climat à l'avant-scène de l'échéancier environnemental du globe. En 1992, des nations se sont rencontrées à Rio de Janeiro pour signer la Convention sur le changement climatique, un accord visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le GIEC a publié une deuxième évaluation scientifique en 1995, dans laquelle on démontre qu'il est de plus en plus évident que l'activité humaine a une influence mesurable sur l'évolution climatique. En 1997, des objectifs spécifiques pour les émissions de gaz à effet de serre ont été établis lorsqu'un nouvel accord international a été signé à Kyoto par 174 pays.

Au Canada comme dans d'autres pays, les chercheurs se concentrent plus maintenant sur les problèmes liés à la pollution atmosphérique, aux gaz à effet de serre et au climat. Au sein du gouvernement fédéral canadien, le Service de l'environnement atmosphérique (Environnement Canada) et des programmes comme le Plan vert ont fourni un soutien dans ce sens. Les quatre ministères fédéraux chargés des ressources naturelles, Environnement, Pêches et Océans, Ressources naturelles et Agriculture et Agroalimentaire, ont signé, en 1995, un protocole d'entente sur les sciences et la technologie pour le développement durable. Son but était de favoriser la recherche coopérative dans des domaines d'intérêt mutuel comme le changement climatique.

En 1992, la Direction générale de la recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada a démarré un programme de recherche sur les gaz à effet de serre et l'ozone au niveau du sol, afin de soutenir le développement durable. Ce programme implique des chercheurs du gouvernement fédéral, des universités, des organismes provinciaux et du secteur privé. Après six années, nous faisons rapport de nos découvertes au public canadien.

La santé de l'air que nous respirons avec *La santé de nos sols* et avec le rapport en cours de rédaction *La santé de notre eau*, forme une série d'évaluations scientifiques des ressources naturelles dont dépend l'agriculture canadienne.

Le présent ouvrage contient nos découvertes les plus récentes. De meilleures estimations des émissions de gaz à effet de serre seront faites au fur et à mesure de l'avancement de la recherche. De nouvelles techniques plus efficaces seront mises au point, et nous en apprendrons plus au sujet de la relation entre l'agriculture et la santé de l'air que nous respirons. La Direction générale de la recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada s'est engagée à soutenir la recherche en vue du développement durable du secteur agricole canadien.

J.B. Morrissey
Sous-ministre adjoint
Direction générale de la recherche
Agriculture et Agroalimentaire Canada

R. Slater
Sous-ministre adjoint principal
Environnement Canada

1. Introduction

L'agriculture et l'environnement sont intimement liés. La production future de denrées alimentaires dépend du maintien de la qualité du sol, de l'air et de l'eau; à l'inverse, nos méthodes de culture ont des répercussions sur ces mêmes ressources. Par conséquent, nous devons évaluer régulièrement les modifications qui se produisent dans l'environnement, d'une part pour nous assurer que l'activité agricole peut se poursuivre de façon durable et, d'autre part, pour mesurer les effets de cette activité sur les autres écosystèmes. Nous avons produit un premier rapport qui s'intitulait *La santé de nos sols*; dans le présent document qui le complète, nous nous pencherons sur *La santé de l'air que nous respirons*.

Contrairement au sol qui est immobile, l'air se déplace et se mélange spontanément sur l'ensemble de la planète. En quelques heures, l'air qui se trouve près du sol peut se mêler à celui qui se trouve à plusieurs kilomètres d'altitude, et les courants atmosphériques parcourent la surface du globe en quelques jours. Les vergers ontariens absorbent un peu du dioxyde de carbone produit par les incendies qui font rage en Asie, et une partie de celui qui est dégagé par de la paille en décomposition en Saskatchewan peut se retrouver dans les jungles d'Amérique du Sud. Il nous faut donc envisager la santé de l'air que nous respirons selon une perspective mondiale.

La santé de l'atmosphère et son importance

L'atmosphère a plusieurs fonctions essentielles. Elle constitue un réservoir de gaz sans lesquels la vie ne saurait exister : dioxyde de carbone et azote assurant la croissance des plantes, oxygène que nous respirons et vapeur d'eau abreuvant les terres sous forme de pluie. L'atmosphère protège également notre planète des températures extrêmes par son pouvoir isolant, et elle filtre les rayonnements du soleil. Elle neutralise même les substances toxiques qu'on y rejette soit en accélérant leur dégradation, soit en les diluant et en les dispersant. Les êtres vivants sont donc entièrement tributaires de l'atmosphère, et ce, pour de multiples raisons, de sorte que nous devons nous inquiéter de toute modification pouvant la concerner.

L'atmosphère en évolution

Les particules et les gaz de l'atmosphère sont constamment échangés avec le sol, l'eau et les organismes vivants. Normalement, la vitesse à laquelle des gaz s'ajoutent à l'atmosphère est contrebalancée par la vitesse à laquelle d'autres gaz la quittent. En conséquence, la composition de l'atmosphère est restée presque constante pendant de nombreux siècles. Cependant, cet équilibre a été rompu par les émissions de plus en plus importantes produites par les activités humaines, de sorte que certains gaz s'accumulent en modifiant la composition de l'air qui nous entoure.

Parmi les changements les plus importants survenus au cours des dernières années, on remarque une augmentation des concentrations de certains gaz dits « à effet de serre », soit le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O) et les chlorofluorocarbures (CFC). Ces gaz absorbent une partie de l'énergie radiante émise par la terre, ce qui a pour effet de réchauffer l'atmosphère. Par conséquent, on prévoit que l'accumulation des gaz à effet de serre provoquera à plus ou moins brève échéance une augmentation des températures à l'échelle mondiale.

Les gaz à effet de serre ne sont pas les seuls constituants de l'atmosphère dont la concentration change. Les activités

humaines, dont l'agriculture, entraînent aussi un accroissement des quantités de certaines autres substances, comme les gaz azotés et soufrés, l'ozone (O_3), les composés organiques gazeux et les particules en suspension. Tout comme dans le cas des gaz à effet de serre, ces modifications sont susceptibles d'avoir un effet sur le climat et l'état de l'environnement.

Les changements qui affectent l'atmosphère ont suscité une telle inquiétude que des efforts de réduction des émissions ont été entrepris à l'échelle mondiale; on retiendra notamment les récents accords internationaux sur la limitation des émissions de produits attaquant la couche d'ozone (protocole de Montréal) et un accord Canada–États-Unis sur la pollution atmosphérique. Mais l'événement le plus notable à cet égard a été la signature en décembre 1997, à Kyoto, au Japon, d'un traité par lequel 174 pays dont le Canada s'engageaient à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Objectifs du présent rapport

À l'échelle mondiale, l'agriculture touche une proportion plus importante des terres (environ 35 %) que toute autre activité humaine. Étant donné l'intensité de cette activité et l'importance des superficies qu'elle occupe, l'agriculture déverse de grandes quantités de gaz dans l'atmosphère. Par exemple, c'est une source très importante de gaz à effet de serre, soit 25 % du CO_2, 50 % du CH_4 et 70 % du N_2O d'origine anthropique à l'échelle mondiale. L'agriculture produit également plus de 50 % de l'ammoniac qui est libéré dans l'atmosphère.

Mais comme leurs terres font l'objet d'une gestion intensive, les agriculteurs peuvent influencer au moins en partie les quantités de gaz qui sont produites. Les types d'émission varient selon les méthodes de culture et, en optant pour de nouvelles pratiques, il est possible d'en réduire l'importance. Dans le cas de certains gaz, les terres agricoles peuvent même absorber de plus grandes quantités qu'elles n'en produisent, contribuant ainsi à rétablir la qualité de l'air.

Dans le présent rapport, nous nous intéresserons plus précisément aux effets de l'agriculture canadienne sur l'atmosphère, et nous tenterons de répondre à trois questions :

- En quoi les pratiques agricoles influencent-elles la composition de l'atmosphère?
- À combien se chiffrent les émissions dans l'atmosphère par l'agriculture?
- Comment peut-on réduire ces émissions?

Portée du rapport

Parmi les changements qui visent l'atmosphère, le plus important et celui qui risque d'avoir les conséquences les plus graves est l'accumulation des gaz à effet de serre. Dans le présent rapport, nous parlerons donc en détail des quantités de gaz à effet de serre qui sont produites et des stratégies qui permettront éventuellement de les réduire. Nous nous limiterons à la production agricole proprement dite et, à l'exception de l'éthanol, nous n'évoquerons pas la destinée des produits de l'agriculture après leur départ de la ferme. Une bonne partie des données présentées ici proviennent d'un programme de recherche entrepris par Agriculture et Agroalimentaire Canada en 1992.

Outre les gaz à effet de serre, nous aborderons aussi plusieurs autres dossiers d'actualité reliés à l'atmosphère, bien que de façon moins détaillée : O_3 troposphérique, ammoniac, rayonnements ultraviolets (UV) en provenance du soleil, aérosols, oxydes d'azote, pesticides et mauvaises odeurs produites par les fermes. Dans toute la mesure du possible, nous nous sommes appuyés sur les conclusions d'études

canadiennes, mais là où les données en provenance du Canada sont encore insuffisantes, nous avons puisé à d'autres sources.

À l'avenir, les changements qui menacent l'environnement à l'échelle mondiale risquent d'avoir des répercussions très marquées pour l'agriculture canadienne : l'augmentation des concentrations de CO_2 pourrait influer sur la croissance végétale; le réchauffement du climat permettra peut-être de cultiver des espèces plus variées, mais il risque également d'attirer les ravageurs; et la nouvelle répartition des précipitations pourra jouer en faveur de certaines régions mais provoquer des sécheresses ailleurs. Il est très difficile de prévoir les changements qui surviendront. Étant donné l'existence de cette incertitude, et aussi parce que nous manquons d'espace dans le cadre de ce rapport, nous n'évoquerons qu'indirectement les stratégies qui permettront à l'agriculture de s'adapter aux changements à venir; nous devrons attendre les résultats des recherches en cours pour préciser cette question.

Principaux constituants atmosphériques

Éléments et composés	Formule ou symbole	Poids atomique ou moléculaire
Éléments		
Hydrogène	H	1
Carbone	C	12
Azote	N	14
Oxygène	O	16
Gaz		
Méthane[1]	CH_4	16
Ammoniac	NH_3	17
Azote	N_2	28
Oxyde nitrique	NO	30
Oxygène	O_2	32
Dioxyde de carbone[2]	CO_2	44
Oxyde nitreux[3]	N_2O	44
Dioxyde d'azote	NO_2	46
Ozone	O_3	48

[1] 1 g de CH_4 contient 0,75 g de C.
[2] 1 g de CO_2 contient 0,27 g de C.
[3] 1 g de N_2O contient 0,64 g de N.

Lecture du rapport

Le présent rapport s'adresse à tous ceux et celles qui s'intéressent aux questions environnementales, aux agriculteurs, aux professionnels du domaine agricole, aux décideurs et à tous ceux qui souhaitent comprendre les liens qui existent entre l'agriculture et la qualité de l'air. La lecture de ce document n'exige aucun bagage scientifique, mais une connaissance sommaire de la notation scientifique pourra être utile. Par exemple, nous parlerons de divers composés contenant de l'azote (N), du carbone (C), de l'oxygène (O) et de l'hydrogène (H); ces éléments sont les principaux constituants des gaz à effet de serre et de la matière organique. Pour le lecteur curieux, nous avons énuméré un certain nombre de composés importants dans l'encadré ci-dessus.

L'information présentée ici provient de nombreuses sources canadiennes et étrangères. Pour alléger la lecture, au lieu de citer chacune des sources, nous avons ajouté une bibliographie générale à la fin de l'ouvrage. On y trouvera une information plus détaillée ainsi que certaines des sources originales.

2. L'agriculture canadienne et les gaz à effet de serre

L'agriculture canadienne est variée; elle dispose en effet d'un éventail de climats et de sols permettant la production de divers types de culture et d'élevage. Les émissions de gaz à effet de serre montrent aussi de fortes variations selon le type d'exploitation agricole et même pour une exploitation donnée. Par conséquent, avant d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre produites par ce type d'activité au pays, il convient de faire un bref survol de l'agriculture au Canada.

Aperçu de l'agriculture au Canada

Le territoire canadien a été divisé en 15 zones écologiques (écozones) selon le sol et le climat. La plus grande partie des terres sont couvertes de forêts, et les régions se prêtant à l'activité agricole ne représentent que quelque 5 % de la superficie du pays et se situent principalement dans deux écozones, soit les Prairies et les plaines à forêts mixtes du Saint-Laurent (fig. 1). Des 68 millions d'hectares de terres agricoles au Canada, environ 80 % se trouvent dans les Prairies. Les deux tiers de l'ensemble des terres agricoles servent aux cultures et aux pâturages « améliorés » (qui sont

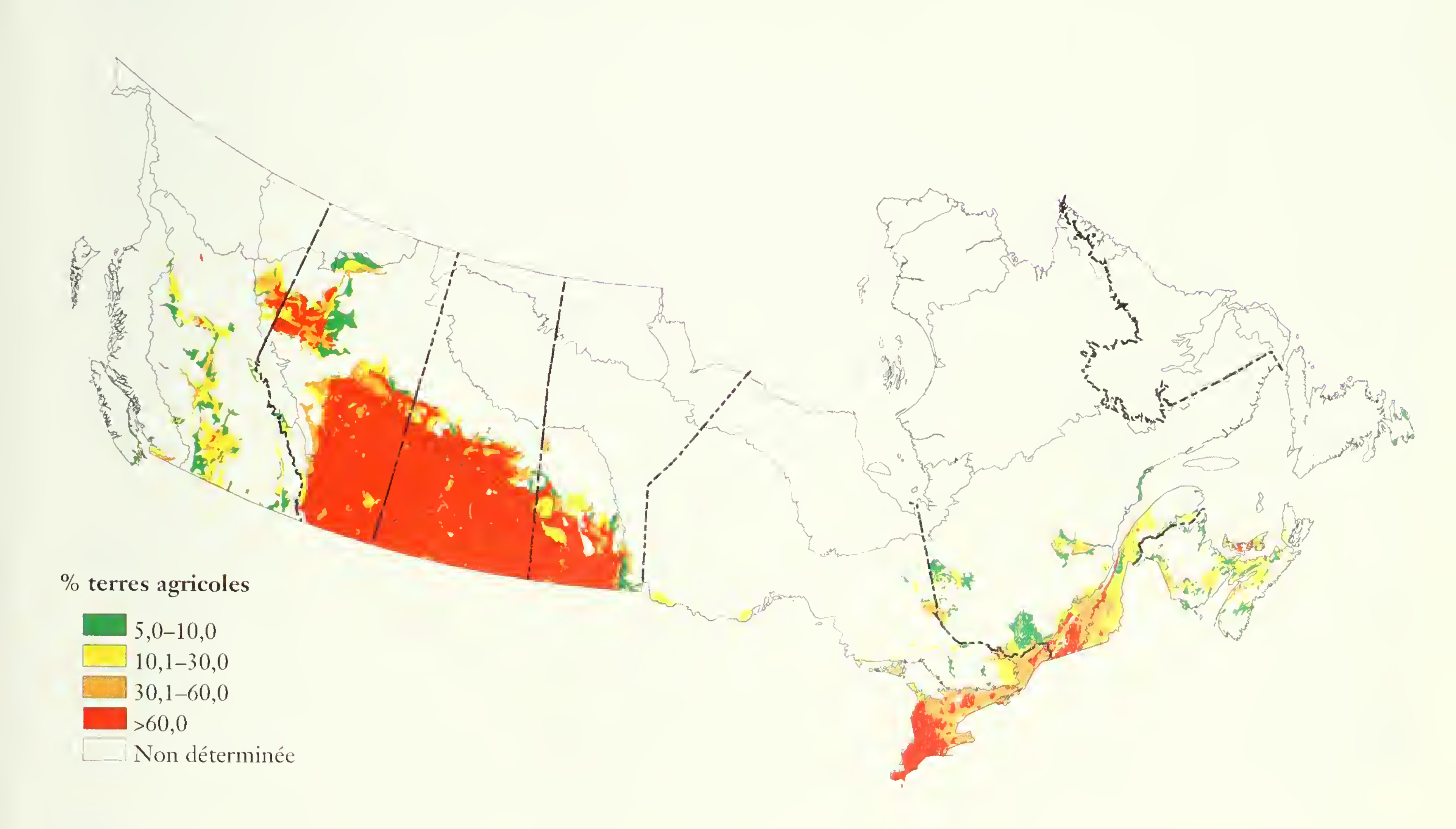


Figure 1

Proportion des terres consacrées à l'agriculture dans diverses parties du Canada en 1996. (F. Wang et D.B. Gleig, AAC)

ensemencées, drainées, fertilisées ou désherbées); le reste est occupé par des pâturages « non améliorés » (en bonne partie des prairies naturelles), des bâtiments, des enclos de ferme, des buissons, des marécages et des marais. Ensemble, les divers types de pâturages comptent pour environ 30 % des terres agricoles (fig. 2).

La proportion de la superficie consacrée aux cultures annuelles et à l'élevage varie fortement selon les régions du pays. Par exemple, de grandes régions des Prairies servent presque exclusivement aux cultures (fig. 3), alors qu'on trouve dans d'autres provinces de petits secteurs où la production de bétail est très concentrée (Colombie-Britannique, sud de l'Alberta, de l'Ontario et du Québec) (fig. 4).

Bien que les cycles des éléments nutritifs soient communs à tous les écosystèmes, l'agriculture présente des caractéristiques qu'on ne retrouve pas dans les autres modes d'utilisation des terres, comme l'exploitation forestière. Les terres agricoles, et tout particulièrement celles qui servent à la production de cultures annuelles, font l'objet d'une gestion intensive; de plus, le cycle des productions agricoles est court, souvent annuel. Par conséquent l'agriculture peut s'adapter rapidement à toute évolution d'ordre climatique, économique ou stratégique par une réaffectation des terres et par le recours à de nouveaux systèmes de production, et des changements importants sont possibles dans l'intervalle de quelques années (tableau 1). Et enfin, les écosystèmes agricoles sont relativement « ouverts » et sont un lieu d'échanges continuels de matières, qu'il s'agisse d'ajouts (p. ex. carburants, engrais et pesticides) ou de retraits (p. ex. produits végétaux et animaux). Contrairement aux forêts où il se produit un accroissement graduel des quantités de bois, les terres agricoles sont rarement le lieu d'une accumulation de matière végétale à long terme. À cause de ces particularités, il est impossible

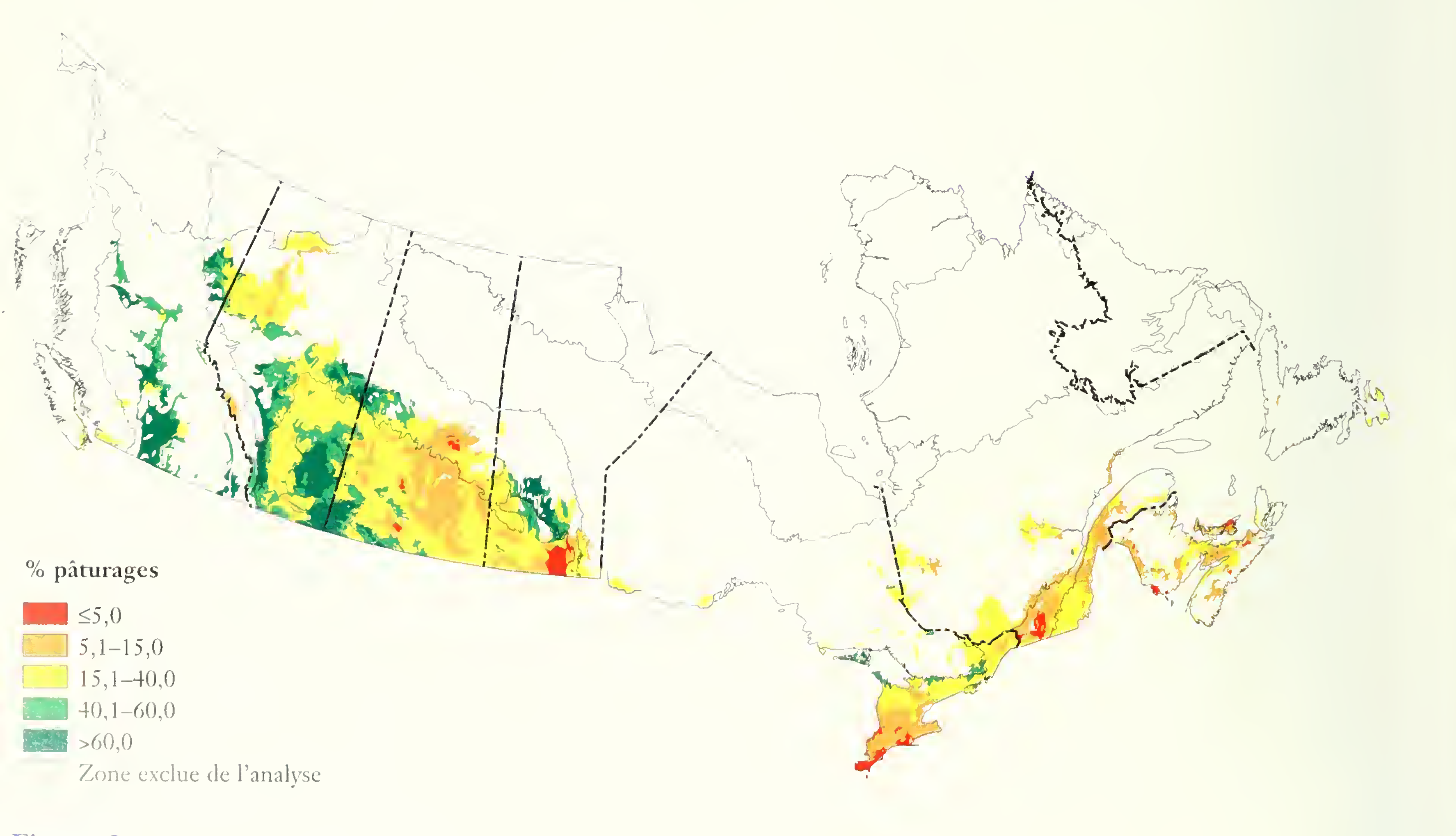


Figure 2

Proportion des terres agricoles utilisées comme pâturages (améliorés et non améliorés) en 1996. (F. Wang et D.B. Gleig, AAC)

% cultures annuelles

- ≤20,0
- 20,1–40,0
- 40,1–70,0
- >70,0
- Zone exclue de l'analyse

Figure 3

Proportion des terres agricoles servant à la production de cultures annuelles en 1996. (F. Wang et D.B. Gleig, AAC)

Unités par ha

- ≤0,05
- 0,06–0,15
- 0,16–0,30
- 0,31–0,60
- >0,60
- Zone exclue de l'analyse

Figure 4

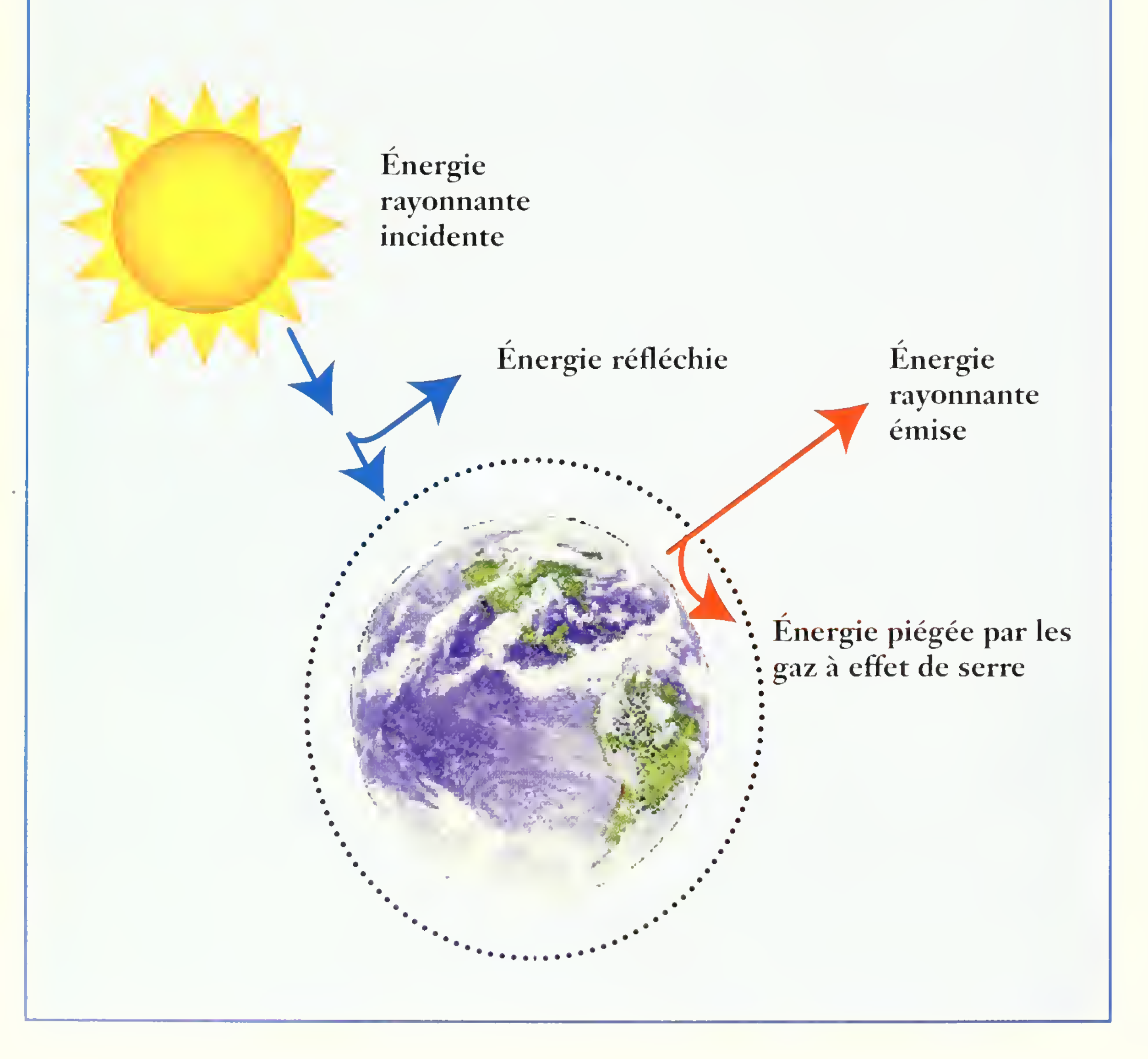
Distribution du bétail au Canada en 1996. Une unité animale correspond au nombre d'animaux produisant 170 kg de N par année sous forme de fumier. Par exemple, deux vaches laitières environ équivalent à une unité animale. (F. Wang et D.B. Gleig, AAC)

Tableau 1 Terres agricoles affectées aux cultures annuelles au Canada (million d'hectares)

	1981	1986	1991	1996
Terres agricoles totales	65,9	67,9	67,7	68,0
Terres labourables	31,0	33,2	33,5	35,0
Terres en jachère	9,7	8,5	7,9	6,3
Pâturages bonifiés	4,4	3,6	4,1	4,4
Pâturages non bonifiés	20,8	22,6	22,2	22,3

L'« effet de serre »

Le rayonnement de courte longueur d'onde émis par le soleil est absorbé par la terre et ré-émis à des longueurs d'onde plus grandes. Le dioxyde de carbone, le CH_4 et le N_2O sont responsables de 90 % de cet « effet de serre ». À long terme, le rayonnement absorbé est compensé par le rayonnement émis. En raison de l'effet de serre, la température moyenne à la surface de la Terre est d'environ 15 °C au lieu de –18 °C.



d'étudier et d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre attribuables à l'agriculture de la même façon que dans le cas des autres écosystèmes.

L'effet de serre

Le rayonnement solaire (y compris la lumière visible) qui atteint la terre la réchauffe. Celle-ci émet à son tour de l'énergie dans l'espace, mais le rayonnement émis n'est pas de même nature que celui du soleil : il a une plus grande longueur d'onde et est invisible. En outre, une partie du rayonnement émis par la terre est absorbé par divers gaz présents dans l'atmosphère, ce qui a pour effet de réchauffer celle-ci. C'est ce qu'on appelle l'« effet de serre » (bien que les véritables serres fonctionnent selon un principe différent!). Le réchauffement ainsi produit est extrêmement bénéfique; sans effet de serre, la température moyenne à la surface de la planète serait d'environ 33 °C plus froide. En d'autres termes, la terre serait inhabitable.

Les gaz responsables du réchauffement de l'atmosphère sont appelés « gaz à effet de serre ». Les principaux sont la vapeur d'eau, le CO_2, le CH_4, le N_2O et les CFC. Parmi ces substances, celle qui revêt la plus grande importance est la vapeur d'eau parce qu'elle absorbe très efficacement le rayonnement de grande longueur d'onde et se trouve relativement concentrée. Cependant, ce gaz est déjà présent en assez grande quantité dans la partie inférieure de l'atmosphère, et toute augmentation de cette quantité n'aurait que peu d'effet sur la température.

Une bonne partie de l'inquiétude que suscitent actuellement les gaz à effet de serre découle de la constatation que les concentrations d'autres gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O et CFC) ont augmenté de façon constante depuis la révolution industrielle et très certainement à cause de l'activité humaine. Les mesures effectuées en 1992 avaient démontré un accroissement de

30 % pour le CO_2, de 145 % pour le CH_4 et de 15 % pour le N_2O. Actuellement, les taux d'augmentation annuelle sont de 0,5 % pour le CO_2, de 0,6 % pour le CH_4 et de 0,3 % pour le N_2O. Les CFC sont apparus pour la première fois dans l'atmosphère il y a quelques décennies seulement. De nombreux spécialistes s'attendent à des répercussions importantes sur le climat mondial si les taux d'accroissement actuels se poursuivent. Par exemple le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat prévoit que le doublement de la concentration de CO_2, qui devrait se produire au cours du XXI[e] siècle, fera augmenter la moyenne des températures mondiales de 1 à 3 °C (un réchauffement jamais égalé au cours des 10 000 dernières années). De plus l'effet de serre pourrait faire augmenter la variabilité du climat.

En résumé, les gaz à effet de serre ont des effets bénéfiques parce qu'ils réchauffent l'atmosphère et créent des conditions favorables à la vie. Cependant, si ces gaz continuent de s'accumuler, ils risquent de produire un « effet de serre amplifié » dont les conséquences pourraient être graves, bien qu'elles soient difficiles à prévoir.

Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

En 1988, l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement ont mis sur pied le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC). Le GIEC évalue les possibilités en matière de recherche et de mesures à prendre et publie des rapports sur l'évolution du climat et sur les risques de réchauffement planétaire.

Le dernier rapport de synthèse, qui est fondé sur les données scientifiques de 1995, renferme les conclusions suivantes :

- La prépondérance de la preuve sur les changements observés nous amène à penser que les humains exercent un effet perceptible sur le climat planétaire.
- Les changements climatiques d'origine anthropique constituent un important stress supplémentaire, en particulier pour les nombreux systèmes écologiques et socioéconomiques qui sont déjà menacés par la pollution et les pratiques de gestion non durables.
- Des réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre sont techniquement possibles et peuvent être rentables sur le plan économique dans tous les secteurs, dont l'agriculture.

Le rapport d'évaluation actuellement en cours de planification constituera le principal apport scientifique pour l'évolution future de la convention-cadre des Nations Unies sur l'évolution du climat et du protocole de Kyoto.

Le Protocole de Kyoto

À Kyoto, les pays développés ont convenu de réduire de 5,2 % leurs émissions totales de gaz à effet de serre par rapport à celles de 1990. Cet objectif sera atteint par des réductions, au niveau national, de 8 % pour la Suisse, pour de nombreux pays d'Europe centrale et d'Europe orientale et pour l'Union européenne, de 7 % pour les États-Unis et de 6 % pour le Canada, la Hongrie, le Japon et la Pologne. La Russie, la Nouvelle-Zélande et l'Ukraine verront à stabiliser leurs émissions, alors qu'il se peut que la Norvège, l'Australie et l'Islande augmentent leurs émissions de 1 %, 8 % et 10 % restpectivement.

Le Protocole a pour but de réduire, d'ici 2008–2012, les émissions totales d'un groupe de six gaz à effet de serre, calculées comme la moyenne sur ces cinq années. Les réductions des émissions des trois gaz les plus importants, soit le CO_2, le CH_4 et le N_2O, seront mesurées en prenant comme base l'année 1990. Les réductions des émissions des trois gaz industriels persistants, soit les hydrofluorocarbures, les perfluorocarbures et l'hexafluorure de soufre, seront mesurées par rapport à la plus bénéfique des années, soit celle de 1990 ou de 1995.

Ententes sur la réduction des émissions

Des dispositions ont été prises à l'échelle internationale pour réduire les émissions de ces gaz dans l'espoir d'éviter l'apparition d'un effet de serre amplifié. Une première entente portant sur la stabilisation des émissions au niveau de 1990 pour l'an 2000 a été signée au Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, en 1992. Une autre entente comportant des obligations plus strictes a été conclue à Kyoto, au Japon, en 1997. Ce dernier protocole prévoyait qu'entre 2008 et 2012 les pays signataires ramèneraient leurs émissions à au moins 5 % au-dessous des niveaux de 1990. Cependant, ce traité n'entrera en vigueur que lorsqu'il aura été ratifié par 55 pays produisant 55 % des émissions totales de gaz à effet de serre en provenance des pays développés.

Dans le protocole de Kyoto, le Canada s'est engagé à réduire ses émissions, entre 2008 et 2012, à 94 % des niveaux de 1990. Mais les émissions de notre pays sont déjà largement supérieures à ce

Méthodologie des recherches sur les gaz à effet de serre

Les sources et les modes d'émission du CO_2, du CH_4 et du N_2O sont complexes. Il faudra procéder à des études en laboratoire et sur des parcelles d'essai pour mieux comprendre les processus biologiques, puis il faudra évaluer les émissions sur des champs entiers et des groupes de champs pour tenir compte des différents sols, des différents paysages et des différents modes de gestion. Finalement, il faudra tenir compte des interactions entre ces trois gaz à effet de serre, tenir compte des variations régionales et climatiques et intégrer l'effet global sur des écosystèmes complets ou sur tout le Canada.

Méthode de recherche

Niveau	Objectifs
Intégration	• application à une échelle spatio-temporelle plus grande • vérification de modèle • interaction des gaz
Ecosystème	• bilans nets pour les gaz à effet de serre • faisabilité des pratiques de réduction des émissions
Procédé	• identification des sources/puits • caractérisation des facteurs déterminant les taux

Résultats

1) contributions nettes des gaz
2) options pour la réduction des émissions

qu'elles étaient en 1990. Selon une évaluation qui a été effectuée, si l'on se fonde sur les augmentations qui se sont produites entre 1990 et 1997 et si l'on suppose que l'évolution se poursuivra normalement après cette date, le Canada devra réduire ses émissions d'environ 21 %. Par conséquent, pour que notre pays réponde à ses engagements, il faudra que tous les secteurs de notre économie entreprennent un effort concerté.

En 1992, Agriculture et Agroalimentaire Canada a mis en oeuvre un programme de recherche pour quantifier les émissions de gaz à effet de serre par le secteur agricole canadien et pour établir des stratégies de réduction de ces mêmes émissions. Les résultats de ces travaux, dont certains sont résumés dans le présent rapport, pourront être utiles à la poursuite de cet objectif.

Évaluation des émissions

Dioxyde de carbone

Le cycle global du carbone

À l'échelle mondiale, il y a environ 40 000 petagrammes (Pg) de carbone en circulation (fig. 5). La plus grande partie se trouve dans les océans, mais de grandes réserves sont également présentes dans les sols, la végétation et l'atmosphère; de ces trois réservoirs, l'atmosphère est celui qui contient les quantités les plus faibles, mais c'est aussi le plus actif. Le CO_2 atmosphérique est continuellement absorbé par les océans et prélevé par les plantes qui effectuent la photosynthèse. Simultanément, cependant, les plantes, les sols et les océans rejettent sans cesse du CO_2 dans l'air. Par conséquent, bien que le carbone soit toujours en circulation, la concentration de CO_2 atmosphérique tend à rester constante d'une année à l'autre. L'analyse des bulles d'air piégées dans les glaciers anciens et des coquillages enfouis dans les sédiments marins a permis de montrer que la concentration de CO_2 dans l'atmosphère était restée voisine de 270 parties par million en volume (ppmv) pendant environ 10 000 ans.

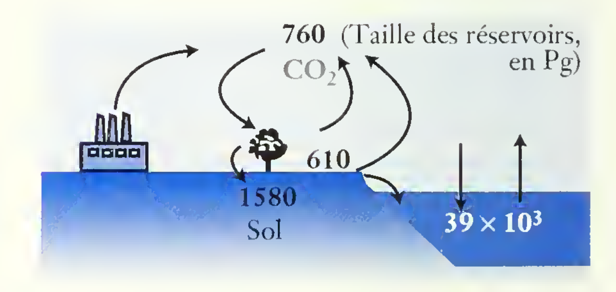


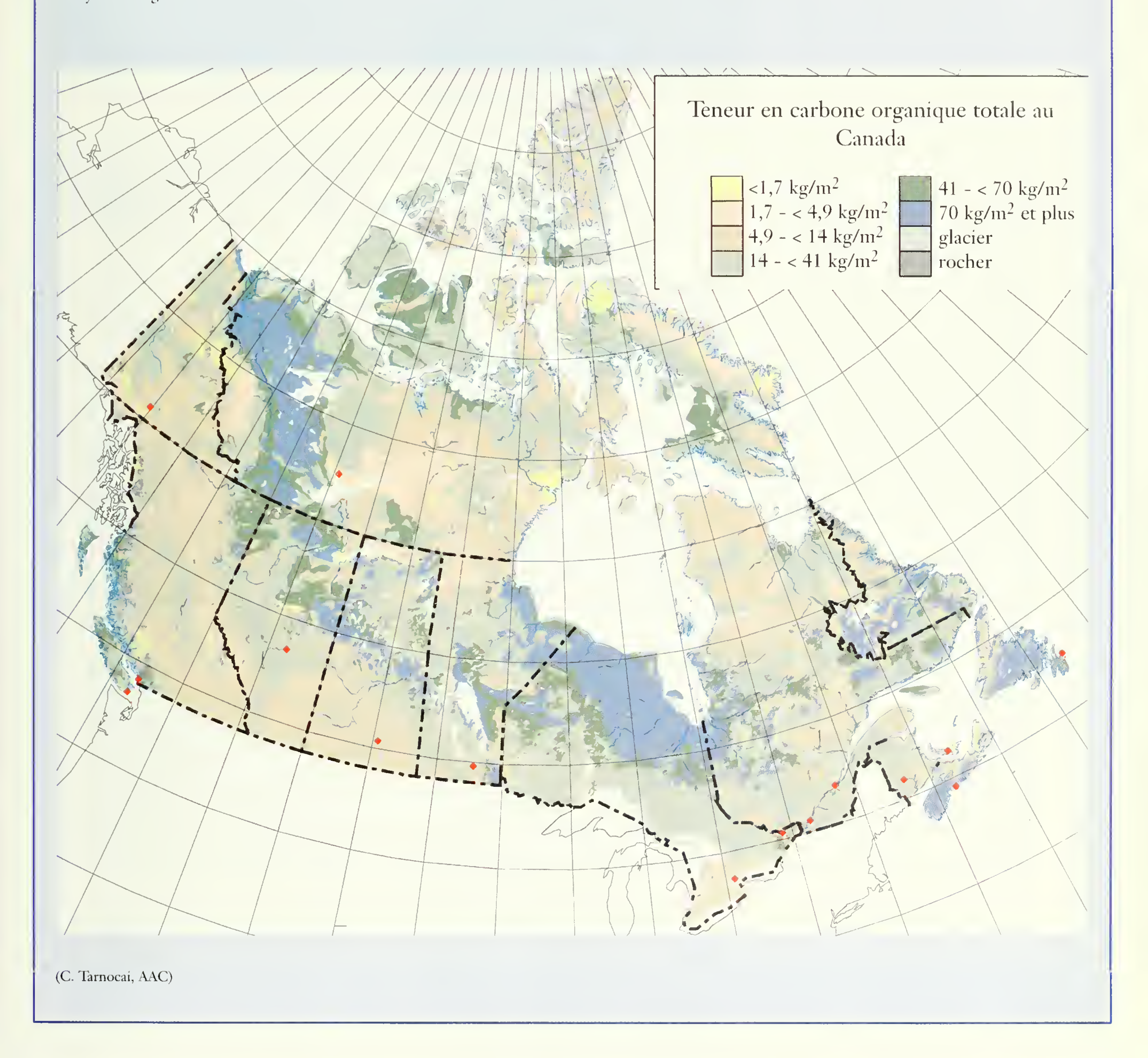
Figure 5

Illustration simplifiée du cycle global du carbone.

Cette situation a changé avec la révolution industrielle : depuis cette époque, la demande d'énergie a été telle

Carte de la teneur en carbone des sols au Canada

La base de données canadienne sur la teneur en carbone organique des sols, constituée de plus de 15 000 polygones de pédopaysages, contient des informations décrivant le pédopaysage et la teneur en carbone de chaque polygone. La teneur totale en carbone dans le premier mètre de tous les sols au Canada est de 260 Pg (milliard de tonnes) et représente 13 % du carbone organique total de la planète. Cependant, la plupart de ce carbone se trouve dans les terres humides du nord et dans le pergélisol, et seuls 10 Pg (milliard de tonnes) environ, soit 4 %, sont contenus dans les sols des écosystèmes agricoles.



(C. Tarnocai, AAC)

que des quantités de plus en plus considérables de combustibles fossiles ont été extraites du sous-sol et transformées en CO_2 atmosphérique. Ce processus a donc pour effet de puiser du C présent dans un réservoir inactif et de l'acheminer dans l'atmosphère sous forme de CO_2. D'autres activités ont également entraîné un accroissement des quantités de CO_2 présentes dans l'air : la destruction des forêts a transformé le carbone végétal en dioxyde de carbone, et la mise en culture de terres qui étaient jusque-là restées non perturbées a également permis la conversion du carbone du sol en CO_2. À cause de ces phénomènes, les émissions de CO_2 dans l'atmosphère excèdent maintenant les quantités qui en sont retirées, ce qui entraîne une accumulation (fig. 6).

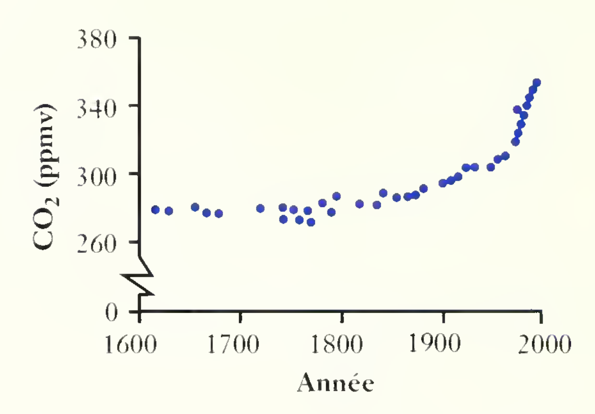


Figure 6

Concentrations à long terme de CO_2 atmosphérique déterminées par analyse de carottes de glace (avant 1950) et d'échantillons d'air (après 1950).

En 1995, la consommation de combustibles fossiles a libéré, à elle seule, 23,5 Pg (milliards de tonnes) de CO_2 dans l'atmosphère. Le cycle naturel du carbone permet de contrebalancer en partie ce surplus; en effet les océans en absorbent une certaine quantité, tout comme les plantes, dont la photosynthèse est stimulée. Mais la quantité totale de dioxyde de carbone présente dans notre air s'accroît malgré tout d'environ 11,7 Pg (milliards de tonnes) par an. À la lecture des relevés hebdomadaires du CO_2 atmosphérique effectués à Alert, dans les Territoires du Nord-Ouest, on remarque en effet une augmentation incontestable en dépit des fluctuations saisonnières reflétant la croissance végétale (fig. 7).

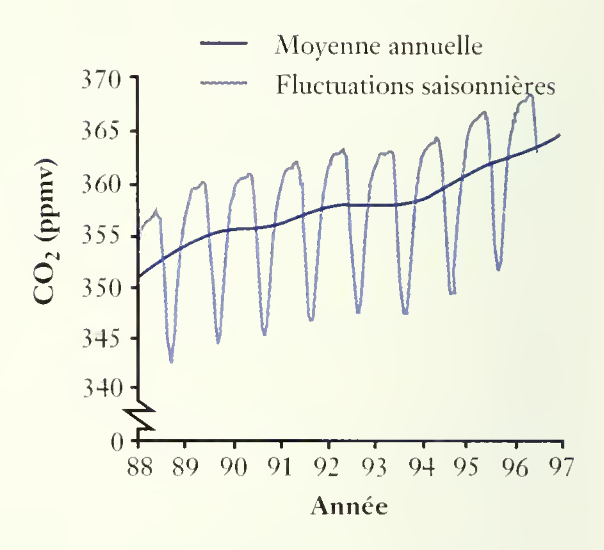


Figure 7

Fluctuations saisonnières des concentrations de CO_2 mesurées à Alert (T. N.-O.). La plus grande partie des terres émergées et, partant, de la végétation se trouve dans l'hémisphère nord. En été, la végétation absorbe une part importante du CO_2 atmosphérique qui est ensuite restituée en hiver lorsque cette végétation meurt.

Cycles du carbone dans les écosystèmes agricoles

Dans les terres cultivées, le carbone suit un cycle assez simple, du moins en principe (fig. 8). Le dioxyde de carbone de l'atmosphère est absorbé par les feuilles des plantes et transformé, par photosynthèse, en composés carbonés comme les sucres, les glucides, la cellulose et la lignine. La plante utilise une partie de ces substances pour subvenir à ses besoins énergétiques et les convertit à nouveau en CO_2. Une partie du carbone restant dans la plante est prélevée lors de la récolte (p. ex. dans les graines de céréales), et le reste se retrouve dans le sol. Ces résidus, qui comprennent aussi les racines, deviennent de la matière organique. Les micro-organismes du sol décomposent alors cette matière organique en libérant le CO_2 dans l'atmosphère, complétant

ainsi le cycle. Celui-ci est essentiellement identique dans tous les systèmes de culture, mais les quantités échangées varient selon le climat, le sol et le type de culture envisagé.

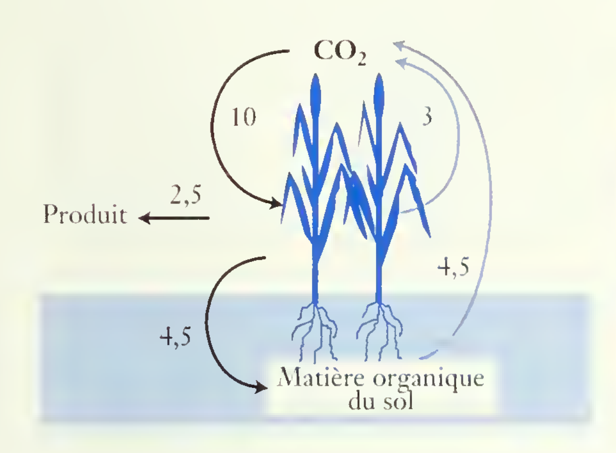


Figure 8

Cycle conceptuel du C pour le maïs (estimations annuelles du flux de C en Mg/ha)

Là où on pratique l'élevage, le cycle du carbone est un peu plus complexe (fig. 9). Au lieu d'être exportée, une part importante des matières végétales sert de fourrage ou de litière pour le bétail. Une certaine partie de ce carbone est rejetée dans l'atmosphère par les animaux sous forme de CO_2 et une autre partie est retirée sous forme de produits animaux, mais une grande quantité retourne dans le sol sous forme de fumier. Dans les systèmes basés sur l'élevage, une plus grande proportion du carbone reste donc généralement sur place. À de nombreux égards, ce cycle ressemble à celui des cultures destinées à la consommation humaine; mais le CO_2 et les déchets résultant de la consommation de plantes cultivées par les humains apparaissent souvent à l'extérieur de la ferme et ne sont donc habituellement pas comptabilisés, bien qu'ils fassent partie du cycle agricole du carbone.

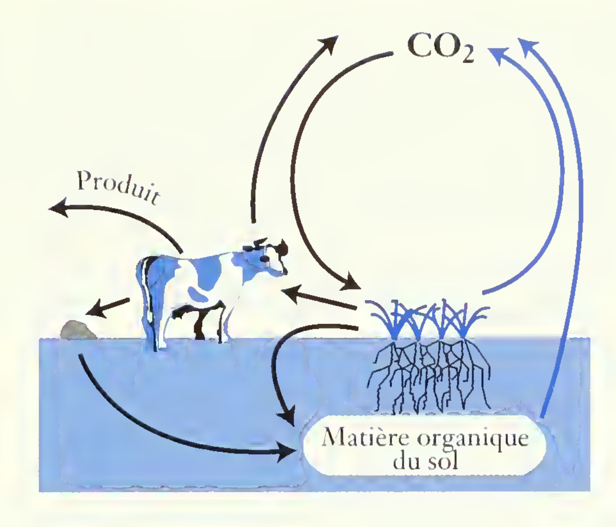


Figure 9

Cycle conceptuel du C pour un système de culture basé sur l'élevage.

Dans les systèmes qui ont subi peu de changements depuis plusieurs décennies, la quantité de carbone qui entre dans le sol sous forme de résidus végétaux est habituellement en équilibre avec la production de CO_2 par l'activité microbienne. Par conséquent, bien que le sol reçoive un apport constant de C, il peut arriver que les quantités qui s'y trouvent entreposées ne varient pas de façon mesurable. Par exemple, dans le cas du maïs (fig. 8), le CO_2 d'origine microbienne produit dans le sol correspond à l'apport de 4,5 Mg (tonnes) de résidus de C par hectare, de sorte que les quantités de C stockées dans le sol ne changent pas.

Effets de la gestion sur le cycle du carbone

Toute modification de la gestion des terres peut avoir pour effet de perturber le cycle du carbone, ce qui se répercutera sur les quantités de C qui y sont stockées. L'exemple le plus frappant est sans doute la mise en culture initiale de certains sols. Cet événement, qui s'est produit dans de nombreuses régions canadiennes il y a plus d'un siècle, a donné lieu à d'importantes diminutions des stocks de carbone dans le sol : à de nombreux endroits, les pertes ont atteint environ 25 % du C présent au départ dans les couches superficielles, qui en

étaient particulièrement bien pourvues, ce qui correspond au rejet de grandes quantités de CO_2 dans l'atmosphère. Ces pertes sont attribuables à plusieurs causes; en premier lieu, toute forme d'agriculture suppose le prélèvement de carbone dans les champs, d'où une réduction des apports en nouveau carbone. De plus, la production de cultures annuelles a souvent pour effet d'accélérer la conversion du carbone en CO_2 par les micro-organismes du sol. Cependant, lorsque les sols ont été cultivés pendant quelques décennies, les pertes de C s'amenuisent généralement ou cessent complètement et les quantités stockées dans le sol se stabilisent de nouveau (fig. 10).

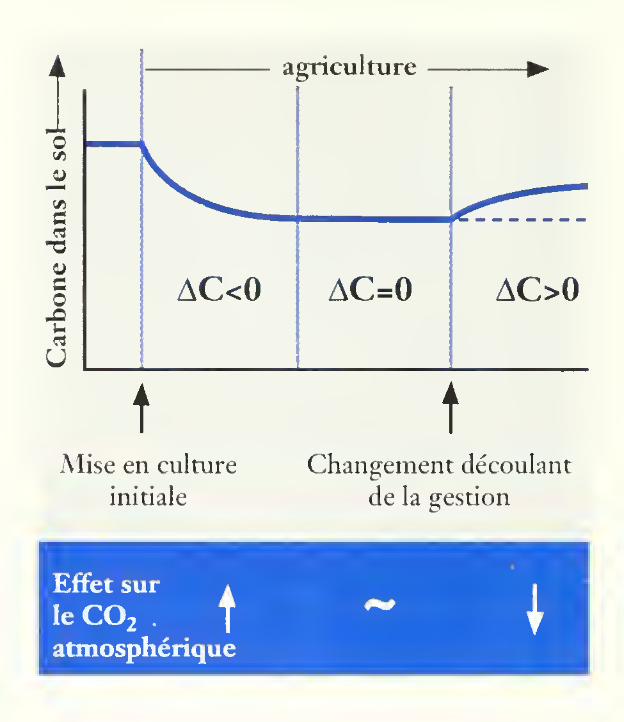


Figure 10

Effet de la gestion sur les variations théoriques du C dans le sol.

La plupart des effets de la mise en culture initiale sur le cycle du carbone ne se manifestent plus à notre époque. Aujourd'hui, nous devons plutôt tenter de comprendre quelles pourraient être les répercussions des pratiques actuelles ou des changements à venir sur le cycle du carbone. Par le choix de leurs productions, de leurs méthodes de culture et des engrais utilisés, ainsi que par d'autres options, les agriculteurs sont en mesure d'agir sur le cycle du carbone et, par conséquent, de modifier la quantité de C emmagasinée par le système.

Mesure des effets de la gestion sur le cycle du carbone

Comment peut-on évaluer l'influence des pratiques agricoles sur le cycle du carbone? Il est possible de mesurer tous les échanges de C dans un champ (fig. 8); on peut ensuite évaluer le changement net en calculant la différence entre les quantités qui quittent le champ et celles qui y entrent. De telles mesures sont utiles si l'on veut déterminer en quoi la gestion influe sur le cycle du carbone, mais elles exigent beaucoup de temps et on ne s'en sert que dans des sites sélectionnés pour des fins de recherches.

On peut aussi mesurer l'échange net de CO_2 entre la végétation et la partie de l'atmosphère située au-dessus. À l'aide de capteurs installés sur des tours surplombant des cultures, les chercheurs mesurent les transferts de dioxyde de carbone de façon continue pendant des mois ou même des années, ce qui leur permet ensuite de calculer les quantités de CO_2 échangées pour l'ensemble du champ. En se servant ainsi de tours, d'avions ou d'autres dispositifs, on obtient une moyenne des émissions nettes de CO_2 sur des superficies étendues, ce qui permet d'intégrer les variations naturelles existant à la surface d'un champ donné. Les principaux désavantages de cette méthode sont les coûts qu'elle entraîne et la difficulté d'intégration sur de longues périodes.

Une troisième méthode, qui est la plus employée, consiste à évaluer le changement de la quantité de C emmagasinée après un certain nombre d'années. Dans les champs agricoles (contrairement à ce qui se passe dans les forêts), pratiquement tout le carbone est stocké sous forme de matière organique dans le sol. En mesurant la quantité de carbone à plusieurs années d'intervalle, les scientifiques peuvent donc savoir si

un certain type de gestion a entraîné un gain ou une perte à ce chapitre (fig. 11).

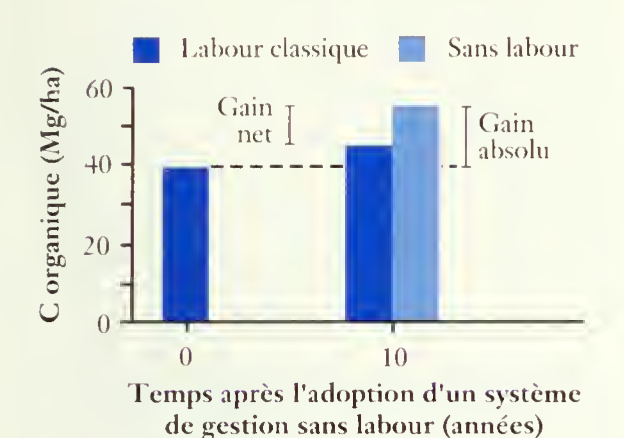


Figure 11

Estimation du gain de C dans le sol après adoption d'un système de gestion sans labour.

Une variante de cette méthode consiste à mesurer et à comparer les changements obtenus avec deux méthodes de culture différentes. Par exemple, pour savoir quels sont les effets du labour sur le stockage de C, on peut faire fonctionner deux systèmes côte à côte, l'un avec des labours, l'autre sans; on pourra ensuite mesurer la différence entre les quantités de carbone stocké dans la parcelle non labourée et dans la parcelle labourée. Mais il n'est jamais facile de mesurer l'évolution des stocks de carbone présents dans le sol. L'augmentation peut être faible, par exemple de 3 tonnes de C par hectare, par rapport aux quantités existant au départ, c'est-à-dire 60 tonnes de C par hectare. À cet obstacle s'ajoutent les fluctuations naturelles de C dans un même champ, qui sont souvent plus importantes que la différence qu'on cherche à calculer. Pour obtenir une mesure précise de l'évolution des quantités de C dans le sol, il faut que l'échantillonnage et l'analyse soient effectués avec grand soin. Certains chercheurs se sont intéressés plus spécialement à certaines formes de C présentes dans le sol ou à des mesures à l'aide d'isotopes pour pouvoir déterminer ces changements avec plus de précision.

Mesures des flux à partir de tours

On dispose maintenant, pour l'Amérique du Nord et l'Europe, de flux à long terme de CO_2, de vapeur d'eau et d'énergie mesurés à partir de tours dans de nombreux écosystèmes. Ces mesures sont faites dans le but

- d'accumuler de nouvelles données critiques, afin d'aider à définir le bilan global du CO_2
- d'améliorer les prévisions relatives aux concentrations atmosphériques futures de CO_2
- de mieux comprendre les échanges de CO_2 entre l'atmosphère et la biosphère
- de déterminer la réaction des flux de CO_2 aux changements climatiques et environnementaux
- de procurer de l'information sur les processus régissant les flux de CO_2 et la productivité nette des écosystèmes
- d'étalonner et de vérifier les données servant aux modèles de flux de CO_2.



Système de mesure de flux de gaz à partir de tours.

(S. McGinn et E. Pattey, AAC)

Appareil Twin Otter

L'appareil Twin Otter, utilisé par le Laboratoire de recherches en vol du Conseil national de recherches du Canada, constitue une excellente plate-forme pour étudier les échanges gazeux près de la surface. Il est équipé de capteurs perfectionnés permettant de mesurer la turbulence et de doser les gaz présents à l'état de traces. À une vitesse de vol de 60 m/s et à une altitude de 30 à 100 m, les instruments enregistrent les données atmosphériques à tous les 2 m. En vol, il permet de calculer les flux nets d'un gaz donné, par exemple CO_2, vapeur d'eau, O_3, CH_4 et N_2O, comme le produit moyen de la vitesse verticale du vent et de la concentration réelle du gaz. La valeur du flux peut être positive (la surface émet plus de gaz qu'elle n'en absorbe), nulle ou négative (la surface absorbe plus de gaz qu'elle n'en émet).



(J.I. MacPherson, NRC, et R.L. Desjardins, AAC)

Un aperçu des ordres de grandeur			
Multiplicateur	Nom	Autre nom	Abréviation
10^0 gramme			g
10^3 grammes	kilogramme		kg
10^6 grammes	mégagramme	tonne	Mg
10^9 grammes	gigagramme	millier de tonnes	Gg
10^{12} grammes	téragramme	million de tonnes	Tg
10^{15} grammes	pétagramme	gigatonne ou milliard de tonnes	Pg

100 m × 100 m = 1 hectare (ha).
1 ha = 2,5 acres.

Pour évaluer les effets du type de gestion sur le cycle du carbone dans des régions plus vastes, on doit faire appel à des modèles. Ces modèles vont de simples équations à des programmes informatiques très complexes qui permettent de prévoir les échanges de carbone résultant de l'activité agricole en fonction de nombreux facteurs tels que les conditions météorologiques, les types de sol et les pratiques agricoles. Quelle que soit la complexité de ces modèles, leur fiabilité doit être vérifiée à la lumière de relevés effectués sur le terrain. À partir de mesures en provenance de certains sites choisis, les chercheurs peuvent donc confirmer leurs modèles et accorder une certaine foi aux prévisions qu'ils ont produites pour des régions étendues.

Exemples de l'effet des pratiques agricoles sur le cycle du carbone

Les scientifiques ont mesuré les effets des pratiques agricoles sur le cycle du carbone en de nombreux sites répartis dans l'ensemble du Canada. Au lieu de tenter de résumer tous ces travaux, nous présenterons quelques exemples de résultats récents.

Rotation des cultures

Les parcelles de Breton, situées près d'Edmonton en Alberta, comptent parmi les sites de recherche en activité les plus vieux au Canada. À cet endroit, l'expérience a permis de montrer qu'une rotation adéquate des cultures faisant alterner les légumineuses et les céréales se traduisait par une forte augmentation des quantités de carbone contenues dans le sol en question, sur lequel une forêt avait été défrichée à l'origine (fig. 12). En comparaison, dans un sol tour à tour mis en jachère puis occupé par du blé, on n'a observé aucun accroissement notable de C. Pour chaque type de rotation, l'accumulation de carbone était plus importante dans les sols qui recevaient de l'engrais que dans les sols non engraissés, sans doute à cause de l'apport de résidus provenant des engrais. Après l'épandage de fumier, l'augmentation du carbone dans le sol était encore plus marquée que l'application d'un engrais; en effet, en plus d'accroître le rendement des cultures, le fumier représente un apport direct de carbone.

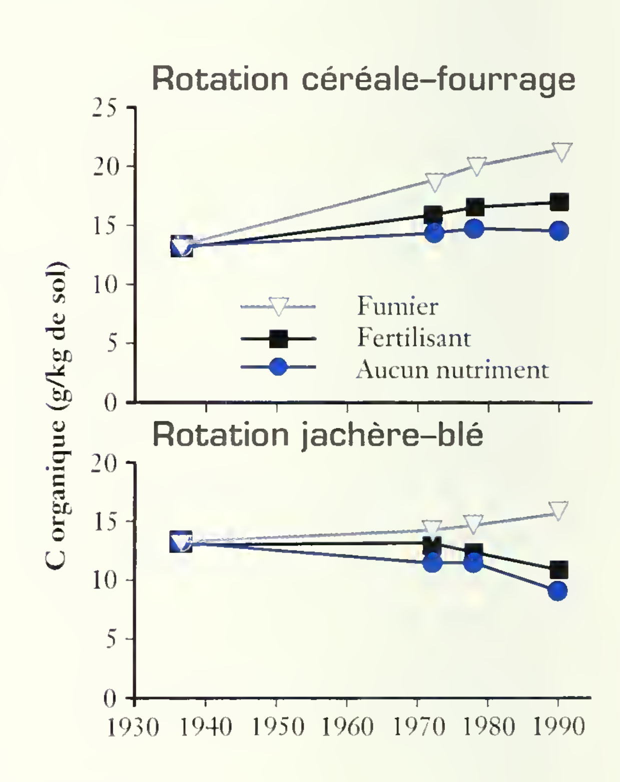


Figure 12

Effet de l'application de nutriments sur la concentration de C organique dans deux systèmes de culture à Breton en Alberta. (R.C. Izaurralde, Université de l'Alberta)

Épandage d'engrais sur les sols cultivés en maïs

L'épandage d'engrais est susceptible de faire augmenter les réserves de carbone du sol. Dans un site ontarien où l'on effectue des recherches à long terme, un champ de maïs fertilisé contenait plus de carbone qu'un autre ayant produit du maïs sans engrais depuis 32 ans (fig. 13). En étudiant les isotopes de C pour distinguer le carbone provenant du maïs de celui provenant de la matière organique préexistante, les chercheurs ont également montré que cette augmentation était entièrement due aux résidus de maïs et que l'épandage d'engrais n'avait eu aucun effet sur la matière organique déjà présente avant l'ensemencement avec du maïs. L'épandage d'engrais sur ce type de sol a permis d'accroître les rendements et, par conséquent, la quantité de résidus qui sont retournés dans le sol. En l'absence d'une modification du rendement après l'épandage d'engrais, il est possible qu'il n'y ait aucune accumulation de carbone dans le sol.

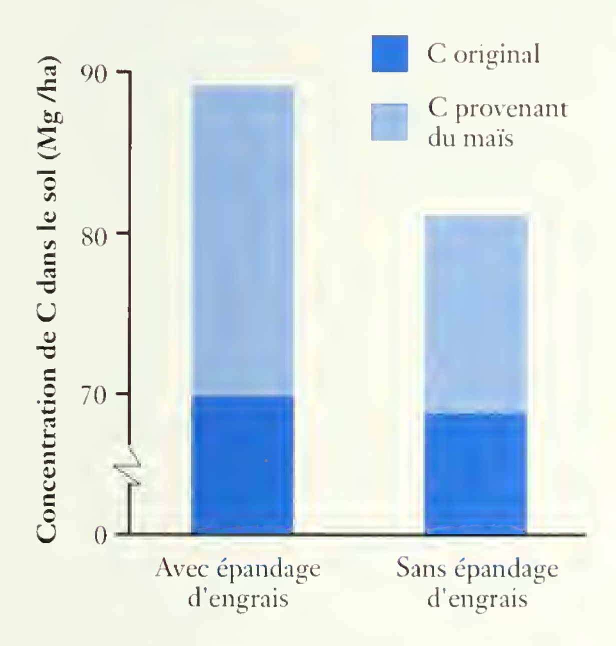


Figure 13

Concentration de C dans un sol ayant servi à la culture du maïs pendant 32 ans. Les proportions de C tiré du maïs et provenant de la matière organique préexistante sont indiquées. (E. Gregorich, AAC)

Gestion des sols

Voici certaines des nombreuses techniques utilisées par les fermiers :

- Travail du sol classique : les sols sont cultivés de la façon habituelle pour éliminer les mauvaises herbes et les préparer à recevoir les semences
- Travail réduit, minimal ou de conservation : le travail du sol est réduit afin de conserver les résidus à la surface
- Sans labour : les semences sont mises en terre sans aucun travail préalable; les mauvaises herbes sont détruites à l'aide de produits chimiques
- Jachère : aucune culture pendant une saison; les mauvaises herbes sont éliminées par labour ou à l'aide de produits chimiques.

La définition du travail du sol diffère suivant les régions.

La culture sans travail du sol peut avoir plusieurs avantages. Elle nécessite moins de temps et de machinerie. Les résidus organiques laissés à la surface du sol aident à conserver l'humidité et protègent contre l'érosion.



Culture sans travail du sol* au Canada

	Superficie sans travail du sol (%)	
	1991	1996
Provinces atlantiques	2	2
Québec	3	4
Ontario	4	15
Manitoba	5	8
Saskatchewan	10	20
Alberta	3	9
Colombie-Britannique	5	9
Canada	7	14

* La culture sans travail du sol comprend les semis directement dans le chaume ou l'herbe, ou le travail du sol sur les billons seulement.

Tableau 2 Exemples des effets de la culture sans labour sur la teneur en C du sol, lors d'études à long terme au Canada

Emplacement	Durée (années)	Système cultural	Gain/perte* de C (Mg/ha)
Ontario	11	Maïs	-0,9
Ontario	18	Maïs-soja	11,5
Sask.	11	Blé	1,8
Sask.	11	Jachère-blé	0,6

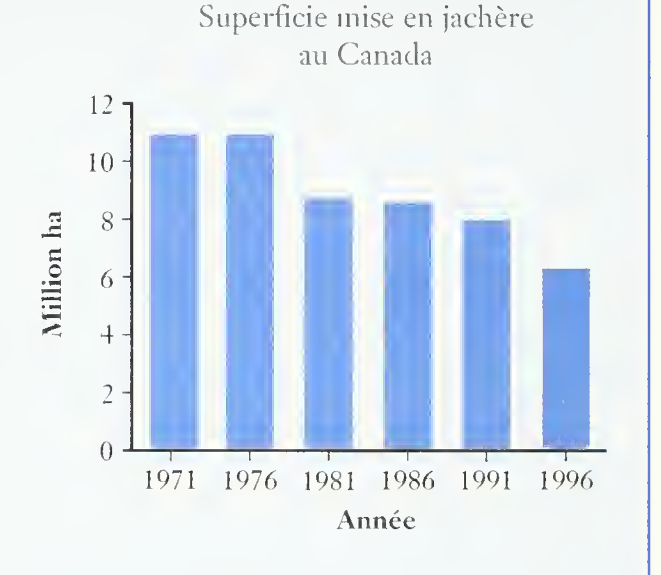
*C dans les terres sans labour - C dans les terres avec labour
Les traitements du sol et la profondeur d'analyse varient suivant le site.
(C. Campbell, AAC; C. Drury, AAC; T. Vyn, Université de Guelph)

Mise en jachère au Canada

Dans les Prairies, où les conditions climatiques sont défavorables, l'agriculture s'est développée un peu par accident. Au printemps 1885, l'armée, qui s'occupait d'étouffer la rébellion, a pris les chevaux de ferme d'Indian Head, en Saskatchewan. Quand les chevaux ont été retournés dans les fermes d'où ils venaient, le temps des semailles était passé. Toutefois, la terre avait été travaillée au cours de l'été et produisit une excellente récolte l'année suivante, tandis que la sécheresse entraîna de mauvaises récoltes partout ailleurs. Des expériences réalisées à la ferme expérimentale fédérale d'Indian Head, mise sur pied peu de temps après, ont mené à la mise au point du système de jachère qui a permis de transformer le triangle de Palliser en grenier du Canada. (Le triangle de Palliser est la zone aride du sud-ouest de l'Alberta et de la Saskatchewan, nommée en l'honneur de l'explorateur du même nom.) Grâce aux méthodes de lutte contre les mauvaises herbes, aux méthodes de fertilisation et aux méthodes de semis, la jachère n'a plus aujourd'hui l'importance qu'elle avait autrefois.

Les champs non cultivés pendant une année doivent encore être désherbés mécaniquement ou chimiquement. Le sol nu est exposé directement aux vents et au soleil, ce qui augmente l'érosion et la décomposition des matières organiques. Sans culture, il n'y a guère de résidus organiques qui retourne dans le sol. La mise en jachère dépend de l'humidité du sol et des rendements prévus. La superficie des terres mises en jachère va continuer de diminuer, estime-t-on, pour se stabiliser à environ 4,5 millions d'hectares vers 2050.

Superficie mise en jachère au Canada



Labour

Historiquement, le labour était l'un des principaux moyens qui s'offraient aux agriculteurs pour lutter contre les mauvaises herbes et pour préparer les terres en vue des semailles. Mais à l'heure actuelle, grâce aux nouveaux herbicides et appareils de semis, les labours ne sont pas toujours nécessaires. Certains agriculteurs ont choisi de ne plus labourer du tout, une pratique appelée « culture sans labour » ou « semis direct » qui peut se traduire par un accroissement substantiel des quantités de carbone dans le sol. Une revue partielle des études effectuées dans l'ensemble du Canada montre que la culture sans labour permet d'augmenter jusqu'à 10 Mg (tonnes) par hectare la quantité de C dans le sol, en comparaison avec un sol labouré (tableau 2). Mais de tels gains ne sont pas automatiques. Dans certains cas, les chercheurs n'ont détecté aucun effet du labour sur la quantité de carbone du sol. La disparité de ces résultats n'est pas surprenante étant donné que l'accumulation de carbone dépend à la fois du climat, des propriétés du sol, du temps depuis lequel on pratique la culture sans labour, du type de rotation des cultures et de nombreux autres facteurs. Une partie des variations observées est peut-être tout simplement due aux difficultés que pose la quantification précise des réserves de carbone du sol.

Jachère

La jachère, qui consiste à laisser une terre sans culture pendant une année entière, était autrefois une pratique très répandue dans l'Ouest canadien parce qu'elle permettait de lutter contre les mauvaises herbes, d'accroître la réserve d'eau dans le sol et d'augmenter les réserves de nutriments. La superficie des zones laissées en jachère a diminué récemment mais représente encore chaque année quelque 6 millions d'hectares. Les sols qui sont régulièrement en jachère contiennent habituellement moins de carbone que ceux qui produisent une récolte par année. Des études à long terme effectuées en Saskatchewan ont montré

qu'après plusieurs décennies les sols ayant produit une récolte de blé par année contenaient plusieurs tonnes de carbone par hectare de plus que ceux qui étaient laissés en jachère une année sur deux (fig. 14). La mise en jachère a deux effets néfastes : elle accélère la décomposition du carbone du sol et supprime les apports pendant l'année sans récolte.

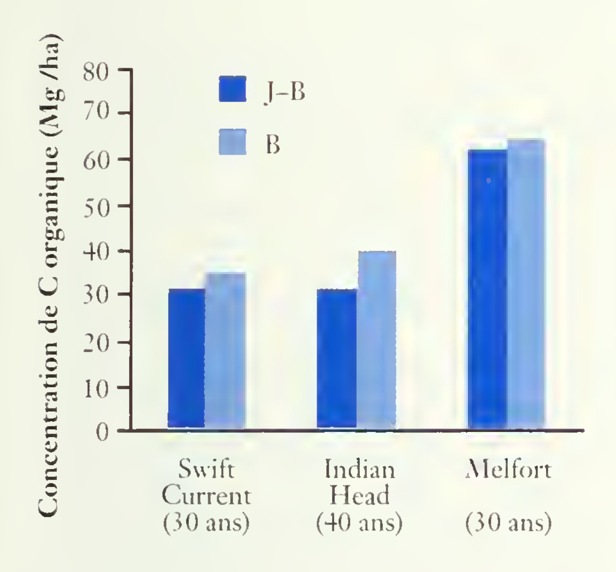


Figure 14

Concentration de C organique dans la couche superficielle de sols fertilisés mis en jachère puis cultivés en blé (J-B) et de sols fertilisés cultivés continuellement en blé (B), dans des sites à long terme en Saskatchewan. (C. Campbell, AAC)

Graminées sur des terres déjà cultivées

L'une des méthodes qui produisent l'accroissement le plus rapide des réserves de carbone du sol consiste à permettre le retour sur les terres cultivées d'une végétation semblable à la végétation naturelle. Dans une étude effectuée à Lethbridge, en Alberta, on a comparé le cycle de C après quatre traitements : graminées indigènes, agropyre à crête (herbacée commune introduite), culture ininterrompue de blé (semis annuels) et alternance jachère–blé (blé un an sur deux). Ces parcelles se trouvaient sur une terre où l'on pratiquait l'alternance jachère–blé depuis de nombreuses décennies. À l'aide de la méthode du bilan de carbone que nous avons déjà décrite, les chercheurs ont montré que les parcelles où poussaient les graminées accumulaient des quantités importantes de C (tableau 3). Par contre les parcelles de jachère–blé perdaient du carbone alors qu'on n'observait ni gain ni perte dans les parcelles de blé.

Épandage de fumier sur les terres cultivées en maïs à ensilage

Le fumier animal est souvent utilisé comme engrais pour les cultures. Dans une étude effectuée à Saint-Lambert, au Québec, l'épandage régulier de fumier pendant 10 ans a fait augmenter les réserves de C du sol (tableau 4). Une partie de cette augmentation provenait directement du carbone présent dans le fumier. Cette quantité représente le recyclage du carbone contenu dans la matière végétale ayant servi de fourrage et de litière aux animaux. Le fumier représente donc un apport de nutriments pour les végétaux et améliore la structure et la porosité du sol, ce qui a aussi pour effet d'accélérer la croissance des plantes

Tableau 3 Bilan du C dans des parcelles semées d'herbes ou de blé à Lethbridge

	Agropyre à crête	Herbes adventices	Culture de blé continue	Blé–jachère
		g / m²		
Production primaire nette	423	315	291	215
Matière récoltée	-101	-66	-76	-58
Apport de carbone dans les sols	322	249	215	157
Perte de carbone par les sols (décomposition des matières organiques)	-191	-196	-207	-178
Gain net en carbone par les sols (perte)	131	53	8	-21

(B.H. Ellert, AAC)

Tableau 4 Apports de carbone, stockage de carbone dans les sols et propriétés physiques d'un limon argileux fin au Québec, après des épandages bisannuels pendant 10 ans de fumier solide de bovins laitiers

Taux d'épandage du fumier (t/ha/2ans)	C provenant du fumier (kg/ha/an)	C provenant des cultures (kg/ha/an)	C stocké dans le sol (kg/ha)	Taille des agrégats (mm)	Porosité (%)
0	0	350	4969	1,3	51
20	870	380	6078	1,6	52
40	1740	430	6459	1,5	54
60	2610	480	7080	1,7	55
80	3480	530	7505	1,7	56
100	4350	600	7708	1,8	56

(A. N'Dayegamyie, MAPAQ, Québec et D.A. Angers, AAC)

Tableau 5 C dégagé sous forme de CO_2 lors de la fabrication et du transport de fertilisants

Fertilisant	kg de C par kg de nutriment (N, P, K)
Ammoniac anhydre	0,8
Urée	1,2
Nitrate d'ammonium	1,1
Sulfate d'ammonium	1,0
Nitrate d'ammonium et d'urée	1,1
Phosphate d'ammonium diacide (N+ P)	1,2
Potassium (K_2O)	0,2

(E. Coxworth, Saskatoon (Saskatchewan))

et d'accroître la quantité de carbone qui retourne dans le sol sous forme de résidus. Non seulement l'épandage de fumier permet un recyclage efficace du carbone végétal, mais il facilite aussi l'accumulation de C dans le sol en favorisant la photosynthèse par les végétaux.

Ces quelques exemples, de même que nombre d'autres études effectuées au Canada, montrent clairement que les pratiques agricoles peuvent influer sur le cycle du carbone et avoir un effet sur les échanges nets de CO_2 en provenance des exploitations agricoles.

Consommation d'énergie

La plupart des systèmes de culture sont tributaires de sources d'énergie extérieures. Une part importante de cette énergie est due à la consommation de combustibles fossiles, un processus qui libère du CO_2 dans l'atmosphère. Pour étudier l'effet global de l'agriculture sur l'atmosphère, on doit donc prendre en compte ce CO_2 puisqu'il fait partie du cycle du carbone lié à l'activité agricole.

Dans les exploitations canadiennes, la plus grande partie du combustible sert à alimenter les machines servant aux labours, aux semis, à la récolte et à d'autres opérations. Une certaine quantité sert également au transport, à l'irrigation, au séchage des récoltes, au chauffage des bâtiments et à l'équipement servant à l'élevage.

En plus des combustibles consommés directement à la ferme, l'agriculture est également tributaire de l'énergie servant à la production et au transport de ses intrants. Par exemple, la fabrication des pesticides et des machines agricoles ainsi que la construction de bâtiments de ferme entraînent une certaine dépense énergétique, mais la part la plus importante de la consommation d'énergie hors de l'exploitation proprement dite a lieu lors de la fabrication et du transport des engrais, et notamment des engrais azotés.

Le volume des émissions de CO_2 qui en résultent dépend du type d'engrais (tableau 5); cependant, en moyenne, la production et le transport d'un kilogramme d'azote entrant dans la composition d'engrais entraînent la libération d'environ un kilogramme de carbone (ou 3,7 kg de CO_2) dans l'atmosphère. Lorsqu'ils évaluent les émissions à l'échelle du pays, les chercheurs associent habituellement ces formes de consommation indirecte d'énergie à d'autres secteurs (p. ex., la production industrielle). Mais cette consommation est néanmoins liée à l'agriculture; tous les efforts faits pour réduire la quantité de fertilisants permettra dès lors de réduire le volume de CO_2.

L'importance des émissions de CO_2 découlant de la consommation d'énergie sur les terres agricoles canadiennes varie considérablement selon qu'on envisage une exploitation plus ou moins intensive. Par exemple, certaines fermes où on élève du bétail sur des prairies exigent relativement peu d'apports d'énergie extérieure. En comparaison, dans les exploitations où on utilise beaucoup d'engrais et où on pratique le labour intensif et l'irrigation, la consommation d'énergie entraîne parfois le dégagement de grandes quantités de CO_2.

Dans une exploitation agricole typique produisant des cultures végétales, les émissions découlant de la consommation d'énergie peuvent être voisines de 100 kg de carbone par hectare par année. Une analyse d'exploitations agricoles effectuée à Indian Head, en Saskatchewan, a montré que le total des émissions de C provenant des utilisations directes et indirectes d'énergie se situaient à environ 100 à 115 kg par hectare par année, selon l'intensité du labour (fig. 15). Les plus importantes sources de CO_2 étaient la fabrication et le transport de l'engrais ainsi que la consommation de carburants à la ferme même.

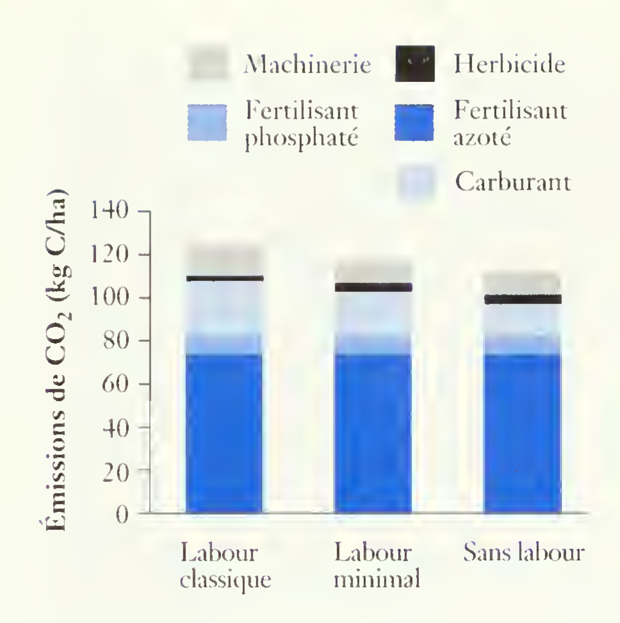


Figure 15

Effet de l'intensité du labour sur la quantité de CO_2 provenant du blé de printemps, à Indian Head (Saskatchewan). (E. Coxworth, Saskatoon (Saskatchewan))

L'effet net d'un système agricole donné sur le CO_2 présent dans l'atmosphère correspond à l'accroissement des réserves de C dans le sol moins les quantités libérées par la consommation d'énergie. Par conséquent, dans le cas d'une ferme où les émissions de CO_2 dues à la consommation de carburants représentent 100 kg de carbone par hectare par année, l'effet net sur le CO_2 atmosphérique ne sera positif que si les réserves de C dans le sol accusent une augmentation de plus de 100 kg par hectare par année. Supposons par exemple qu'un certain champ accumule 4 Mg (tonnes) de carbone par hectare sur plusieurs décennies grâce à une meilleure gestion, puis que les réserves de C dans le sol se stabilisent à une nouvelle valeur plus élevée : le bénéfice net pour l'atmosphère sera la différence entre l'accroissement des réserves de carbone du sol d'une part et la somme des émissions de CO_2 dues à la consommation d'énergie d'autre part (fig. 16). Si le CO_2 produit par la consommation d'énergie équivaut à 100 kg de carbone par hectare par année, les émissions de CO_2 seront équivalentes à l'accroissement des réserves de C dans le sol après environ 40 ans. Après cela, le

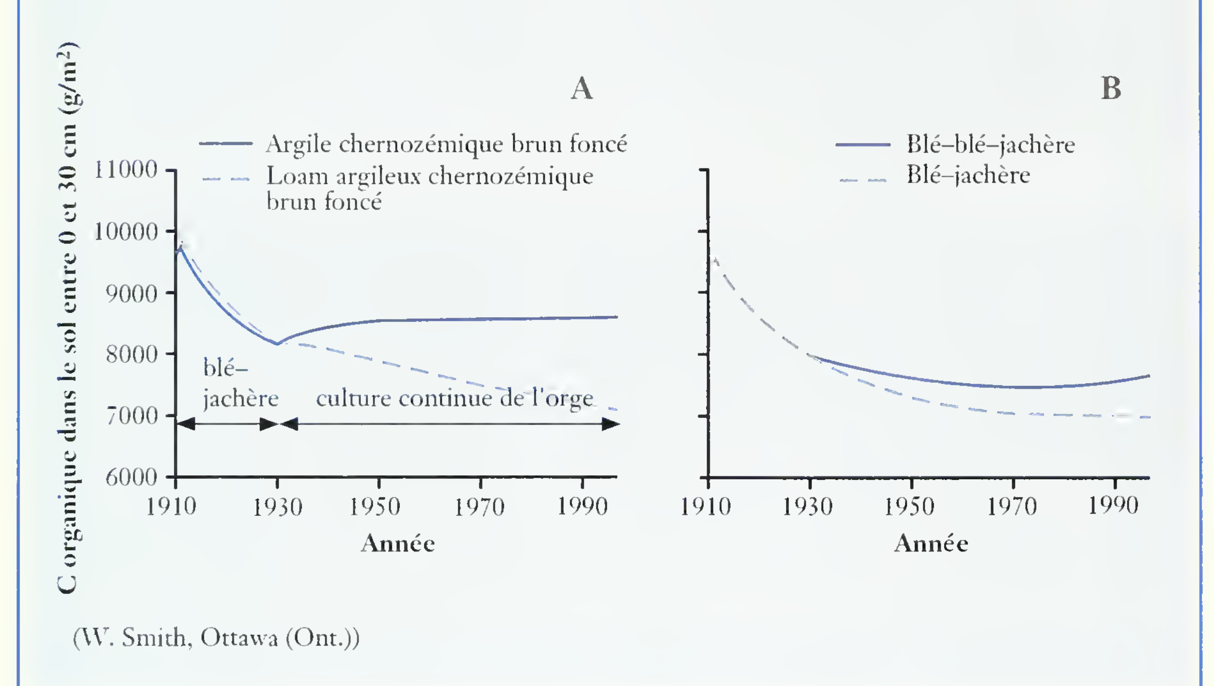
Modélisation de la teneur en carbone du sol

Dans le modèle Century, qui est spécifique à chaque site, on se sert de relations simplifiées illustrant les interactions sol–plante–climat pour décrire la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol des prairies, dans les cultures, dans les forêts et dans les savanes. Ce modèle permet de rendre compte de plusieurs techniques de gestion agricoles, dont l'ensemencement, la fertilisation, le travail du sol, le pacage et l'apport de matières organiques. Il simule la production végétale aérienne et souterraine en fonction de la température du sol et de la disponibilité de l'eau et des nutriments. Les changements de teneur en carbone du sol en Saskatchewan prévus par le modèle Century sont donnés pour deux cas :

A) deux types de sols et changement d'une rotation blé–jachère à une culture continue de l'orge en 1930

B) un type de sol, limon argileux tchernoziom brun foncé, mais deux rotations différentes après 1930.

Prévisions du modèle Century pour différents types de sols et différentes rotations de cultures



(W. Smith, Ottawa (Ont.))

champ redeviendra un producteur net de CO_2 à moins qu'on ne parvienne à accroître encore les réserves de carbone du sol.

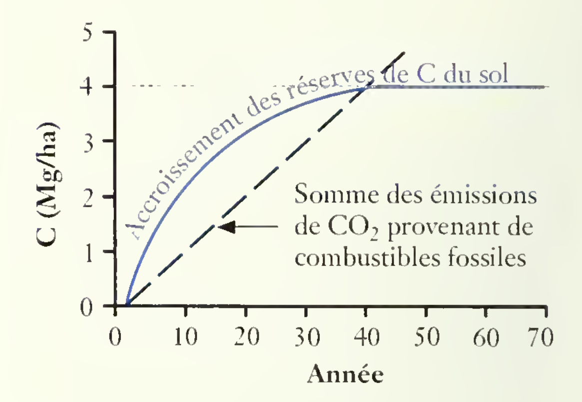


Figure 16

Graphique illustrant les réserves de C du sol et la somme des émissions découlant de la consommation de combustibles fossiles dans un agroécosystème.

Évaluation des émissions de dioxyde de carbone au Canada

Les scientifiques calculent les quantités de CO_2 émises par l'agriculture en évaluant d'une part les changements annuels qui affectent les réserves de carbone et d'autre part les quantités de CO_2 libérées par la consommation de combustibles fossiles (fig. 8). La plus grande partie des réserves de C des écosystèmes agricoles se trouve dans le sol, de sorte qu'on peut évaluer les changements de quantités emmagasinées à partir des gains ou des pertes nettes de carbone dans le sol.

Évaluation des changements influant sur les réserves de carbone dans le sol

Il est difficile de quantifier l'évolution des réserves de C dans le sol pour l'ensemble du Canada, parce que les propriétés des sols et les pratiques de gestion varient d'une région agricole à l'autre. D'autre part, une mesure directe de ces changements exigerait un effort colossal.

Notre évaluation se fonde donc sur des modèles mathématiques.

Dans une étude récente, on a prévu l'évolution des réserves de carbone contenues dans les sols agricoles du Canada à l'aide d'un modèle détaillé (« Century ») et à partir de données sur les climats et les sols de l'ensemble du pays. Les renseignements relatifs aux pratiques agricoles étaient tirés de données récentes de Statistique Canada. L'étude en question couvrait tous les principaux systèmes agricoles du pays mais ne tenait pas compte de toutes les variantes possibles. Certains des facteurs qui n'ont pas été pris en compte sont
a) le brûlage de biomasse, une pratique qui est devenue peu commune;
b) l'érosion des sols, qui déplace le carbone; c) l'épandage de fumier; d) le labour qui occupe une plus petite superficie (intermédiaire entre la culture « classique » et la culture sans labour). Certains de ces facteurs seront peut-être inclus dans les analyses à venir.

Les prévisions découlant de ce modèle concordent avec les observations historiques, c'est-à-dire que les réserves de carbone du sol diminuent rapidement après la mise en culture initiale, mais les pertes diminuent graduellement pendant que le sol tend vers un nouvel « état stable », puis elles cessent (fig. 17). Le modèle indique que les pertes actuelles de carbone sont négligeables; de plus il prévoit qu'à l'avenir les sols agricoles regagneront une partie du carbone perdu, lorsque les agriculteurs opteront pour de meilleures pratiques telles que la culture sans labour et la jachère réduite (tableau 6). Toujours selon le même modèle, en 1970 les sols agricoles perdaient environ 3 Tg (millions de tonnes) de carbone par année mais ils pourraient en gagner 0,4 Tg par année vers l'an 2010. Les taux de modification des réserves de carbone du sol varient selon les régions, reflétant l'adoption plus ou moins complète des pratiques améliorées ainsi que les différences relatives aux propriétés des sols. Par exemple, le modèle indique que les gains les plus élevés ont lieu en Saskatchewan et les plus faibles en Alberta.

Variation de la teneur en carbone des sols agricoles au Canada en 1990

En agriculture, les principales réserves de carbone se trouvent dans le sol où des végétaux morts se sont accumulés au cours des siècles. Cependant, le travail du sol a considérablement modifié ces réserves de carbone, les réduisant d'environ 15 à 35 %. Le programme de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada a confirmé que, dans de nombreux cas, les agriculteurs ont été capables, grâce à une bonne gestion, de réduire ou même de renverser cette perte de carbone.

Le modèle Century (une simulation par ordinateur de la dynamique des matières organiques dans les sols) a été utilisé pour estimer la vitesse à laquelle variait la teneur en carbone des sols au Canada au cours de 1990. On a obtenu des données sur les sols, les superficies cultivées, le travail du sol et la rotation des cultures pour 1229 polygones de pédopaysage au Canada. On a appliqué le modèle Century à 15 % de ces polygones. Pour chaque polygone choisi, on a procédé à une simulation en utilisant de un à cinq types de rotations de cultures et un mode de travail classique du sol. On a aussi procédé à des simulations de sol non travaillé pour des polygones dans lesquels les sols non travaillés représentaient 5 % ou plus de la surface agricole.

La carte montre les variations dans la teneur en carbone dans les sols agricoles des Prairies au cours de l'année 1990. On a estimé la perte moyenne en carbone à environ 40 kg/ha/an, ce qui est de beaucoup inférieur à la quantité mesurable.

Variation de la teneur en carbone en 1990 (t/ha)



(W. Smith, Ottawa (Ont.))

Tableau 6 Estimation de la variation de la teneur en C organique dans les terres cultivées[1] au Canada, selon le modèle Century

	1970	1981	1986	1991	1996
Variation en C moyenne (kg/ha/an)	-67	-51	-48	-35	-11
Variation en C total (Tg/an)	-2,7	-2,1	-2,0	-1,4	-0,5

[1] Pâturages non compris.
[2] Depuis 1910, la teneur en C organique des sols cultivés a diminué de 24 % (1053 Tg C). Au Canada, la teneur en carbone total dans le premier mètre des sols agricoles est de 10 000 Tg.
(W. Smith, Ottawa (Ont.))

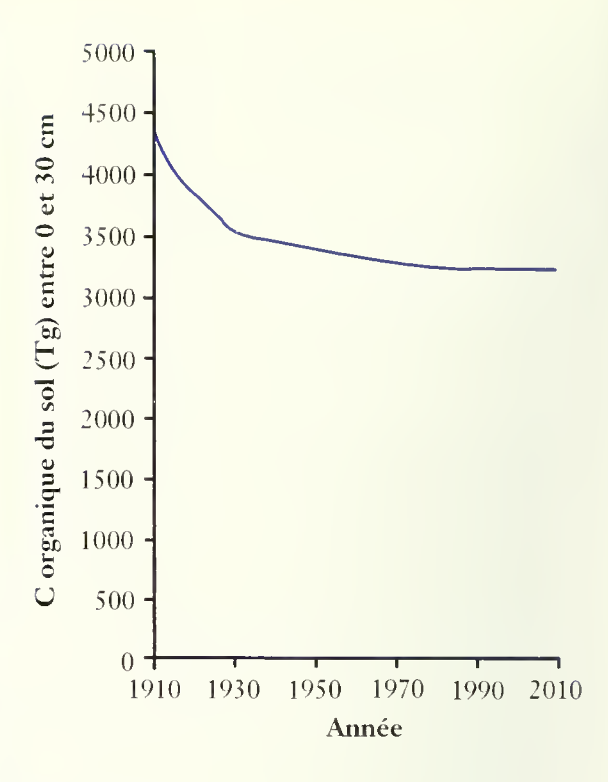


Figure 17

Prévisions à long terme des fluctuations de C dans le sol selon le modèle Century dans l'hypothèse de l'adoption graduelle seulement d'un système sans labour. (W. Smith, Ottawa (Ont.))

Tableau 7 Estimation des émissions de CO_2 liées à l'utilisation des combustibles fossiles en agriculture au Canada

	1981	1986	1991	1996
		($Tg\ CO_2$)		
Utilisation directe				
Combustibles utilisés dans les fermes	9,5	7,7	8,1	9,5
Utilisations indirectes				
Production, transport et épandange de fertilisants	4,4	5,5	5,1	6,6
Production et réparation de machinerie	4,8	4,8	4,8	4,8
Construction de bâtiments (production d'acier et de ciment)	2,5	2,2	2,3	2,2
Production de pesticides	0,2	0,3	0,3	0,3
Production d'électricité	1,8	1,9	2,1	2,4
CO_2 indirect total d'origine fossile	13,7	14,7	14,6	16,3

(R.L. Desjardins, AAC; E. Coxworth, Saskatoon (Sask.))

Tous les taux de changement prévus sont modestes comparés au total des réserves de carbone. Par exemple, si on fait une moyenne sur l'ensemble des sols cultivés au Canada, un gain de 0,4 Tg de carbone par an représente moins de 0,01 Mg (tonne) par hectare par an. Cette valeur est très faible par rapport à la quantité totale de carbone existant dans les sols, qui est souvent de l'ordre de 60 à 100 Mg (tonnes) par hectare.

Les prévisions fournies par le modèle Century représentent la meilleure évaluation que l'on puisse faire de l'évolution des réserves de carbone du sol dans l'ensemble du pays. Mais ces prévisions reposent sur plusieurs simplifications et n'ont pas encore été testées pour toutes les conditions existant au Canada. Par exemple, les changements prévus s'avèrent parfois inférieurs de 50 % à certaines données expérimentales sur l'évolution des réserves de carbone en l'absence de labours. Ces évaluations pourront être affinées au fur et à mesure que les

recherches se poursuivront et que les modèles deviendront de plus en plus fiables.

Émissions produites par la consommation de combustibles fossiles

Outre le cycle biologique du carbone, la consommation de combustibles fossiles représente l'autre grande source de CO_2 d'origine agricole. L'utilisation de combustibles sur les exploitations agricoles mêmes libère presque 10 Tg (millions de tonnes) de dioxyde de carbone par an (tableau 7). À ce chiffre s'ajoute la libération de CO_2 provenant de la fabrication et du transport des intrants, qui sont des sources indirectes. La plus importante de celles-ci est la production et le transport des engrais, qui ont donné lieu à une augmentation constante des émissions parce que la consommation d'engrais est à la hausse. La fabrication de machines agricoles, la construction d'installations et la production d'électricité entraînent aussi d'importantes émissions de CO_2. En 1996, le total des émissions de dioxyde de carbone provenant des sources indirectes atteignait 16 Tg (millions de tonnes).

Par conséquent, en 1996 la consommation directe et indirecte de combustibles fossiles par les exploitations agricoles canadiennes s'élève à environ 26 Tg (millions de tonnes) de CO_2 (7 Tg de C). Cependant, lorsqu'ils établissent les inventaires nationaux, les chercheurs n'affectent à l'agriculture que le dioxyde de carbone produit par la consommation de combustibles sur place (environ 3 Tg de CO_2); ils regroupent le reste avec les émissions produites par les secteurs de la production industrielle, de la construction et des transports.

Tableau 8 Estimation des émissions de CO_2 par l'industrie agricole au Canada à partir de sources directes et indirectes

	1981	1986	1991	1996
		(Tg de CO_2)		
Émissions directes				
Sols	7,7	7,3	5,1	1,8
Combustibles utilisés dans les fermes	9,5	7,7	8,1	9,5
Émissions directes totales	17,2	15,0	13,2	11,3
Émissions indirectes	13,7	14,7	14,6	16,3
Émissions totales attribuables à l'agriculture	30,9	29,7	27,8	27,6

(R.L. Desjardins, AAC)

Total des émissions

Le total des émissions de CO_2 produites par l'activité agricole au Canada est égal à la somme des pertes nettes subies par les réserves de carbone du sol, des émissions découlant de la consommation directe de combustibles fossiles et des émissions produites par les utilisations indirectes de combustibles fossiles (tableau 8). Selon ces estimations, en 1996 l'activité agricole a libéré dans l'atmosphère environ 28 Tg de CO_2, c'est-à-dire un peu moins qu'en 1981. Les projections indiquent qu'en 2010 le total des émissions devrait être sensiblement le même qu'en 1996. Les scientifiques prévoient que les émissions en provenance des sols diminueront probablement et deviendront négatives (c'est-à-dire que les sols accumuleront du carbone), mais que pendant ce temps les émissions attribuables aux sources indirectes pourraient s'accroître et annuler ces gains. Cependant, ces estimations ne tiennent pas compte des gains qui pourraient résulter d'un effort concerté visant à réduire les émissions et donnent à penser que les tendances actuelles se poursuivront.

Méthane

Le méthane est le principal constituant du gaz naturel, et c'est probablement la forme sous laquelle nous le connaissons le mieux. Bien qu'il existe dans l'atmosphère en concentrations très faibles (environ 2 parties par million en volume), c'est un gaz à effet de serre relativement efficace : sur une période de 100 ans, le réchauffement provoqué par un kilogramme de CH_4 est 21 fois supérieur à celui provoqué par la même quantité de CO_2. Cet effet ne résulte pas entièrement de l'action du CH_4 lui-même, mais il est aussi produit de façon indirecte, le méthane finissant par exemple par se transformer en CO_2.

La concentration de CH_4 dans l'atmosphère augmente actuellement de quelque 0,6 % par an alors qu'elle a déjà connu un taux d'accroissement de 1,1 %. De façon générale, l'agriculture est l'une des principales sources de CH_4; elle compte pour environ les deux tiers des émissions d'origine anthropique.

La plus grande partie du CH_4 produit par l'agriculture résulte de la dégradation microbienne des matières végétales.

Tableau 9 Estimation des émissions de CH_4 par le bétail et par le fumier en 1991

	Nombre d'animaux (Millions)	Masse de fumier (Tg)	Méthane produit par le fumier (Gg)	Méthane produit par le bétail (Gg)	Méthane total (Gg)
Bovins laitiers	2	17	70	190	260
Bovins de boucherie	11	98	10	558	568
Porcs	10	19	102	15	117
Volaille	103	3	8	S/O	8
Moutons/ agneaux	1	0,4	0,2	8	8
Total	127	137	190	771	961

(R.L. Desjardins, AAC)

Normalement, lorsque l'oxygène est présent en quantité suffisante, la majorité du carbone présent dans les végétaux en décomposition se transforme en CO_2. En l'absence d'oxygène cependant, la décomposition est incomplète et le carbone est alors libéré sous forme de CH_4. Dans les systèmes agricoles, de telles conditions existent dans le tube digestif des ruminants (p. ex. bovins) et dans les sols saturés d'eau (p. ex. rizières); la combustion incomplète de carburants ou de déchets organiques produit aussi de petites quantités de CH_4. Le méthane et le dioxyde de carbone sont donc complémentaires dans une certaine mesure, puisqu'une bonne partie du carbone qui n'est pas converti en CH_4 est relâché sous forme de CO_2.

Le CH_4 libéré dans l'atmosphère a une durée de vie moyenne de 12 ans, puis des réactions chimiques en transforment la plus grande partie en CO_2. Les micro-organismes du sol convertissent probablement moins de 10 % du CH_4 atmosphérique en CO_2.

Émissions de méthane par le bétail

Tous les animaux produisent du méthane en digérant leurs aliments, mais les quantités dégagées par les bovins, les moutons, les chèvres et les autres ruminants sont particulièrement importantes. Ces espèces possèdent un rumen, ou « pré-estomac » dans lequel la fermentation microbienne assure une transformation partielle du fourrage, ce qui permet aux animaux en question de digérer efficacement les aliments fibreux. Mais comme la fermentation se déroule dans un milieu pauvre en oxygène, une partie du carbone présent dans le régime alimentaire (souvent de 5 à 10 %) est libérée sous forme de CH_4 et non de CO_2 (fig. 18). Pendant leur digestion, les non-ruminants comme les porcs et les volailles émettent aussi du méthane mais en quantité comparativement négligeable (tableau 9).

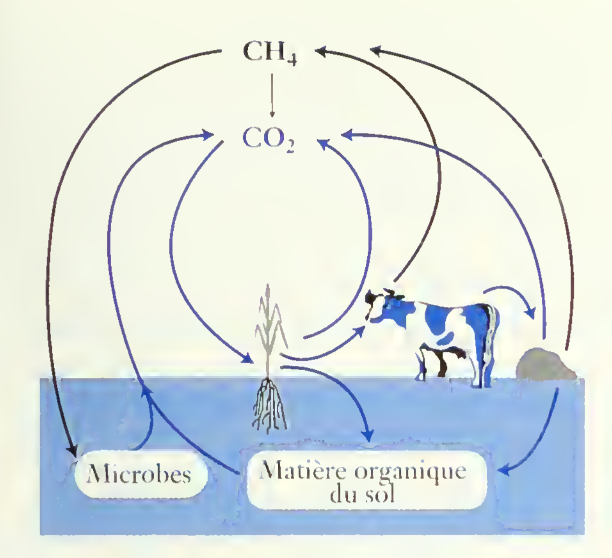


Figure 18

Flux de CO_2 et de CH_4 dans un agroécosystème basé sur l'élevage.

Émissions par les vaches laitières

Une étable comprenant un système de manutention du lisier liquide a été équipée pour contrôler les émissions de 118 vaches laitières (CO_2, CH_4 et fumier). De telles expériences permettent de déterminer les quantités de gaz à effet de serre émis par le bétail. La vitesse de conversion en CH_4 de l'énergie provenant des aliments dépend de la quantité et de la qualité de ces aliments. Les vaches laitières émettent annuellement beaucoup plus de CH_4 que les autres bovins.



Vaches participant, sans le savoir, à une expérience de mesure des gaz à effet de serre à la Ferme expérimentale centrale, à Ottawa (Ontario).

(H. Jackson et R. Kinsman, AAC)

Mesure des émissions de méthane

Il existe plusieurs façons de mesurer les quantités de CH_4 produites par le bétail. Une méthode consiste à placer l'animal dans un espace clos et à mesurer la quantité de méthane qui s'accumule dans cet espace. Cette technique permet une analyse précise, mais l'évaluation risque d'être faussée parce que l'animal ne se trouve pas dans son milieu habituel. Récemment, des chercheurs ont donc quantifié les émissions de méthane produites par des bovins qui se trouvaient dans leur milieu; ils ont mesuré la concentration de CH_4 dans l'air qui s'échappait par les conduits d'aération d'une étable où se trouvaient des vaches laitières, puis ils ont calculé les quantités produites par tous les animaux en question, y compris par leur fumier. Ils ont ainsi pu quantifier non seulement le taux moyen de production de CH_4 par animal (environ 550 litres par vache par jour) mais aussi les fluctuations quotidiennes et saisonnières de ces taux d'émission (fig. 19 et 20). Par exemple, les émissions étaient habituellement plus importantes immédiatement après chaque apport de fourrage.

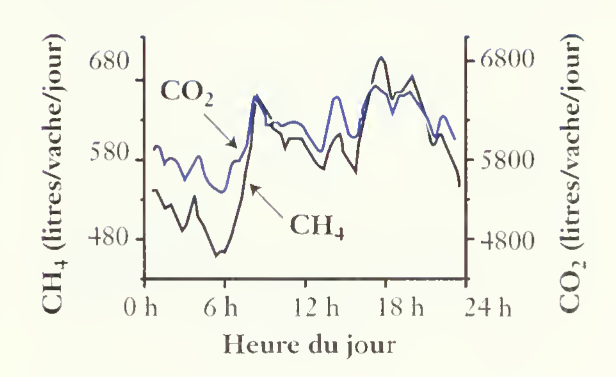


Figure 19

Fluctuation quotidienne des émissions de CO_2 et de CH_4 par des vaches laitières. (H. Jackson et R. Kinsman, AAC)

Mesure des émissions de méthane par les animaux qui broutent

Les chercheurs peuvent mesurer la quantité de CH_4 émis par les bovins qui broutent en utilisant l'hexafluorure de soufre (SF_6) comme gaz de référence. Des capsules qui rejettent graduellement du SF_6 à une vitesse constante sont placées dans le rumen des animaux. Les chercheurs peuvent ensuite calculer les quantités de CH_4 émises en comparant le rapport des concentrations de CH_4 et de SF_6 dans l'air expiré par l'animal.



Bouvillon équipé pour la mesure de la production de CH_4 à l'aide d'un gaz de référence.

(P. McCaughey, AAC)

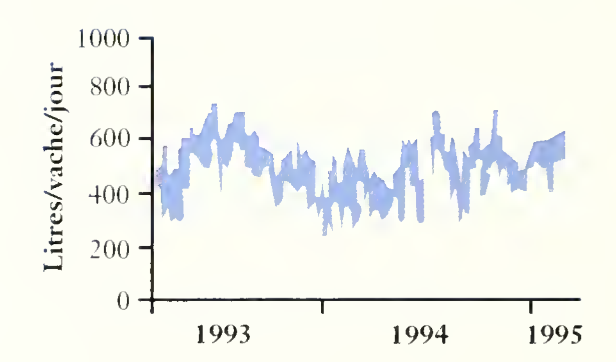


Figure 20

Émissions mensuelles moyennes de CH_4 provenant d'une étable de vaches laitières à Ottawa. (H. Jackson et R. Kinsman, AAC)

La mesure du CH_4 produit par les bovins en pâture présente d'autres obstacles, mais les chercheurs disposent maintenant d'une nouvelle technique qui consiste à mesurer directement les émissions de CH_4 en provenance d'animaux en pâture à l'aide d'un marqueur chimique. Dans un pâturage du Manitoba, cette méthode a permis de montrer que les taux de production étaient voisins de 0,7 litre par kilogramme de poids corporel par jour (0,5 g de CH_4 par kilogramme par jour).

Facteurs qui influencent la production de méthane

De nombreux facteurs influent sur le taux d'émission de CH_4 par les ruminants. Ils sont relativement bien connus parce que la libération de méthane résulte d'une utilisation incomplète de l'apport énergétique alimentaire. La proportion de l'énergie brute du fourrage perdue sous forme de CH_4 peut atteindre 15 %. C'est pour cette raison que les chercheurs se sont penchés sur les facteurs influant sur l'émission de méthane longtemps avant qu'on s'inquiète des effets de ce gaz sur l'environnement.

La qualité du fourrage est l'un des facteurs qui influent le plus sur le taux d'émission de CH_4. De façon générale, les régimes qui accélèrent la digestion réduisent la production de méthane parce que dans ce cas les aliments ne séjournent pas aussi longtemps dans le rumen. Plusieurs caractéristiques du fourrage peuvent donc avoir un effet sur les émissions de CH_4 : la proportion de fourrage grossier dans l'alimentation, le mode de conservation, le stade de croissance de la plante fourragère, le degré de hachage ou de mouture, la quantité de céréales présente dans l'alimentation et l'ajout d'huiles. Par exemple, les quantités de méthane produites peuvent diminuer si on remplace les graminées par des légumineuses, les produits séchés par des produits d'ensilage et les fourrages grossiers par d'autres très concentrés.

La quantité de fourrage ingérée est un autre facteur qui revêt une certaine importance. Lorsque l'ingestion de fourrage dépasse le niveau de maintenance, le volume de CH_4 dégagé par animal s'accroît mais la digestion devient également plus efficace. Par conséquent, lorsqu'une grande quantité de fourrage est ingérée, la quantité de méthane émise par unité de produit (p. ex. lait ou viande) diminue habituellement. C'est pour cette raison qu'il est souvent préférable de calculer la quantité de CH_4 émise par unité de produit et non par animal ou par unité de fourrage.

Dans le cas des animaux en pâture, les émissions de CH_4 peuvent être influencées par l'intensité du broutage. Dans une étude effectuée au Manitoba, une réduction de moitié du nombre de bovins de boucherie par hectare a eu pour effet de faire augmenter la production de CH_4 par animal, mais de faire diminuer la production par hectare. Au total, la quantité de méthane émise par kilogramme de gain de poids (environ 150 g de CH_4 par kilogramme de gain de poids) n'a pas été modifiée par l'intensité du broutage.

Les quantités de CH_4 produites dépendent aussi de la race de l'animal, de son poids, de son taux de croissance et du fait qu'il soit ou non en lactation, ainsi que du milieu où il se trouve. Certaines recherches permettent de penser que les émissions pourraient augmenter dans des conditions de températures basses. Étant donné la multitude de facteurs qui ont un effet sur la production de CH_4 chez le bétail, il est possible qu'on soit en mesure de réduire ces émissions en modifiant les pratiques de gestion.

Évaluation des quantités de méthane émises par le bétail

On peut calculer les quantités de CH_4 qui sont émises directement par le cheptel canadien en multipliant le nombre de têtes par un taux d'émission moyen par tête. En 1991, les émissions de CH_4 produites directement par les animaux de ferme au Canada s'élevaient à environ 771 Gg (milliers de tonnes) (tableau 9). De ce total, 72 % provenaient des bovins de boucherie et 25 % des bovins laitiers. En comparaison, les émissions directes produites par les autres types de bétail étaient presque négligeables.

Émission de méthane provenant des fumiers

Le méthane est produit par les animaux eux-mêmes mais il provient également du carbone qu'ils excrètent (fig. 18). Le fumier, comme toute autre matière organique, est décomposé par les microorganismes. Si la décomposition se déroule dans un milieu bien aéré, la plus grande partie du carbone est libérée sous forme de CO_2. Cependant, dans un milieu pauvre en oxygène, il peut y avoir production de grandes quantités de méthane.

Le rapport entre les quantités de CO_2 et de CH_4 qui sont produites dépend du mode de gestion des fumiers. Une grande partie du méthane est libérée pendant l'entreposage. Lorsque le fumier est entassé, l'intérieur du tas est mal aéré, ce qui peut provoquer des émissions de CH_4. L'entreposage sous forme liquide peut produire encore davantage de méthane parce que dans ce cas l'aération est restreinte. Il est donc possible que le fumier de porc, qui est souvent entreposé sous forme liquide, émette de grandes quantités de CH_4. Lorsque le fumier est épandu sur le sol, il dégage peu de méthane parce qu'il est bien exposé à l'air.

À partir des estimations de la production de fumier et des taux d'émission de CH_4, on peut évaluer la quantité de ce gaz provenant de cette source au Canada (tableau 9). Les calculs indiquent que les fumiers représentent environ 20 % des émissions totales attribuables au bétail (fumiers et production directe). Cette évaluation fait ressortir l'importance du fumier de porc comme source de

méthane, à la fois à cause de son mode de gestion et de la taille du cheptel.

Émission et absorption de méthane par les sols

Les sols peuvent soit dégager, soit absorber du CH_4, ce qui dépend en grande partie de leur teneur en eau. Lorsque les matières organiques se décomposent dans des sols submergés ou détrempés, l'eau limite la circulation d'oxygène, ce qui provoque la libération de grandes quantités de méthane. À l'échelle mondiale, par exemple, les rizières sont une importante source de CH_4 atmosphérique. Dans les sols agricoles du Canada, cependant, l'émission de méthane se limite probablement à des marécages de superficie restreinte ou peut-être à de courtes périodes pendant lesquelles les terres basses sont submergées, c'est-à-dire lors de la fonte des neiges ou de fortes précipitations. La plupart des sols ne produisent pas de méthane parce qu'ils sont suffisamment aérés; ils « absorbent » même le méthane parce qu'ils hébergent des micro-organismes qui convertissent le CH_4 en CO_2. Les quantités absorbées dépendent en partie du mode de gestion. Par exemple, l'absorption de méthane est habituellement plus intense dans les sols de prairie que dans les sols labourés, et elle est inhibée par l'épandage d'engrais azotés.

Bien que l'absorption de CH_4 par les sols joue un rôle important dans le cycle du méthane à l'échelle mondiale, les quantités absorbées par les sols agricoles au Canada sont probablement modestes si on les compare à l'ensemble des volumes produits par les fermes (tableau 10). Les chercheurs évaluent à 12 Gg (milliers de tonnes) par an l'absorption nette de CH_4 par les sols agricoles au pays. Même si l'absorption de méthane par les sols accusait une forte augmentation, elle ne couvrirait qu'une petite proportion des émissions actuellement produites par le bétail et les fumiers.

Tableau 10 Estimation des émissions totales de CH_4

	1981	1986	1991	1996
Bétail	849	748	771	879
Fumier	208	192	190	208
Sols	-12	-12	-12	-12
Combustibles	1	1	1	1
Total (Gg de CH_4)	1046	929	951	1076
Total (Tg d'équivalents de CO_2)	22	20	20	23

(R.L. Desjardins, AAC)

Autres sources de méthane

Les combustibles fossiles en usage dans l'agriculture dégagent de petites quantités de CH_4 par évaporation et combustion, soit environ 1 Gg (mille tonnes) par an (tableau 10). Le brûlage de résidus de cultures émet aussi du méthane, mais les volumes en cause sont limités et continueront de diminuer parce que cette pratique est en voie d'être abandonnée.

Évaluation des émissions nettes en provenance de toutes les sources

Pratiquement tout le CH_4 résultant de l'activité agricole au Canada provient du bétail (tableau 10). Selon les estimations actuelles, en 1996 les fermes canadiennes ont émis environ 1 Tg (million de tonnes) de méthane, dont quelque 80 % venaient directement du bétail, et le reste du fumier produit par celui-ci.

Ces émissions fluctuent d'une année à l'autre en même temps que le nombre de têtes, qui évolue lui-même selon le coût des fourrages, les prix des produits sur le marché intérieur et à l'exportation. Si le

cheptel s'accroît comme prévu, la production de méthane risque d'augmenter encore à moins que les exploitants optent pour de nouvelles méthodes pour réduire le volume des émissions par animal.

Oxyde nitreux

Nous connaissons l'oxyde nitreux comme anesthésiant. Il est naturellement présent dans l'atmosphère en très faible quantité (environ 0,3 partie par million en volume), mais cette concentration s'accroît à un taux d'environ 0,3 % par an. Une grande partie de cette augmentation est due à l'agriculture, qui produit jusqu'à 70 % du total des émissions de N_2O d'origine anthropique.

Cette augmentation constitue une menace double. Premièrement, le N_2O est un puissant gaz à effet de serre qui subsiste longtemps dans l'atmosphère (environ 120 ans). Son potentiel de réchauffement est 310 fois supérieur à celui du CO_2 sur une période de 100 ans. Deuxièmement, dans la haute atmosphère, l'oxyde nitreux est converti en oxyde nitrique (NO), un gaz qui décompose l'ozone (O_3). L'ozone présent dans les couches supérieures de l'atmosphère filtre les ultraviolets émis par le soleil; s'il se raréfie, la surface de la terre recevra donc de plus fortes doses de rayonnements UV nocifs. Par conséquent, l'accroissement des niveaux de N_2O, en plus d'accentuer l'effet de serre, risque de causer indirectement une augmentation de l'intensité des rayonnements UV que nous recevons.

La plus grande partie du N_2O provenant de l'activité agricole est produite dans le sol. Pour comprendre les origines de ce gaz et les facteurs qui déterminent sa libération dans l'atmosphère, il est utile d'examiner le cycle global de l'azote en milieu agricole.

Cycle de l'azote

Les écosystèmes terrestres comportent trois principaux réservoirs de N qui sont le sol, les plantes et l'atmosphère (fig. 21). L'atmosphère est le plus grand de ces réservoirs; la colonne d'air située au-dessus d'un hectare de terrain contient quelque 76 millions de kg d'azote, soit environ un million de fois la quantité utilisée chaque année par les plantes qui croissent sur cette surface. Cependant, pratiquement tout cet azote se trouve sous forme de N_2, un gaz presque inerte qui n'est pas directement assimilable par les plantes.

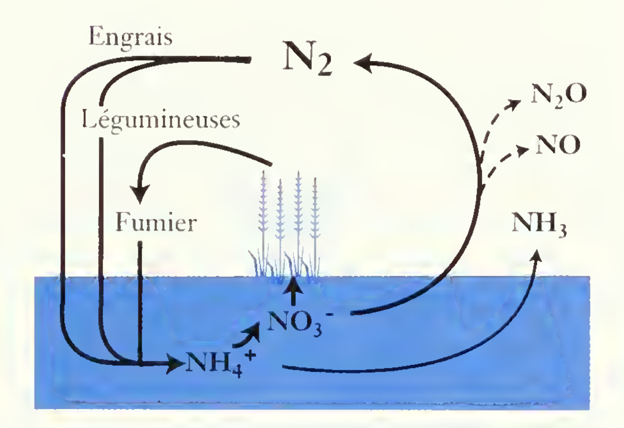


Figure 21

Cycle conceptuel du N dans un agroécosystème.

Bien qu'ils vivent dans un nuage d'azote gazeux, les végétaux absorbent presque tout celui dont ils ont besoin par leurs racines sous forme de nitrate (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+) dissous dans l'eau du sol. Ensuite, lorsque la plante meurt, l'azote contenu dans la matière végétale retourne dans le sol, où il entre dans la composition de la matière organique. Les micro-organismes du sol décomposent alors graduellement celle-ci en libérant du NH_4^+ qui peut être converti en NO_3^-. Ces deux formes peuvent de nouveau être absorbées par les végétaux et le cycle est ainsi complété. Dans les écosystèmes « naturels », ce cycle entre le sol et les plantes peut se poursuivre presque indéfiniment, de très petites quantités de N atmosphérique étant ajoutées par la

foudre ou certaines bactéries spécialisées du sol.

Sur les terres agricoles, le cycle est plus complexe parce que de grandes quantités d'azote sont prélevées sous forme de récoltes. Actuellement, les systèmes de production sont conçus précisément pour maximiser la quantité de N (protéines) contenue dans les parties des végétaux qui sont récoltées. Dans le cas du blé à haut rendement, par exemple, la récolte des grains représente un prélèvement de plus de 100 kg de N par hectare par an. Par conséquent, pour que le cycle se poursuive et que la production reste possible, il faut que des apports extérieurs permettent de remplacer l'azote ainsi perdu.

L'air constitue la principale source de nouvel azote. Il existe deux voies de conversion du N_2 normalement inerte en formes assimilables par les plantes. La première est la voie industrielle qui convertit l'azote gazeux en engrais « chimiques » à l'aide de l'énergie produite par les combustibles fossiles. L'autre est la voie biologique qui consiste à faire « fixer » le N_2 par des légumineuses telles que la luzerne, le trèfle, les fèves et les pois. Les racines de ces végétaux portent des nodules contenant des bactéries qui convertissent l'azote de l'air en formes assimilables par la plante. Lorsque celle-ci meurt et se décompose, l'azote ainsi absorbé est relâché dans le sol sous forme de NH_4^+.

L'azote provenant des engrais et des légumineuses a permis un accroissement important de la production alimentaire, mais pour approvisionner une population toujours croissante, les agriculteurs auront besoin de quantités d'azote encore plus considérables. Au total, les apports de N représentés par ces deux sources excèdent déjà les apports « naturels » (principalement la fixation par la foudre et par les bactéries non associées aux cultures). Bien que ces ajouts permettent de poursuivre la production alimentaire, ils exercent une pression sur le cycle de N et donnent souvent lieu à des pertes ou « fuites » d'azote dans le milieu naturel (fig. 21). Une grande partie de l'azote ajouté aux cultures (jusqu'à 50 %) peut atteindre les nappes d'eau souterraines par lessivage. L'azote s'échappe également dans l'atmosphère sous diverses formes gazeuses : ammoniac (NH_3), oxyde nitrique (NO), N_2 et N_2O. En outre, la plupart de ces « fuites » proviennent du réservoir d'azote assimilable par les végétaux (NH_4^+, NO_3^-). Ces pertes sont donc plus élevées lorsque les producteurs ajoutent des quantités qui dépassent les besoins des plantes ou lorsqu'il n'y a aucune croissance végétale.

Tableau 11 Estimation de la proportion de N émis sous forme de N_2O par divers fertilisants, lors d'études en laboratoire

Fertilisant synthétique	% des fertilisants azotés émis sous forme de N_2O
Urée	0,3
Sulfate d'ammonium ($(NH_4)_2SO_4$)	0,1
Nitrate d'ammonium (NH_4NO_3)	0,3
Ammoniac anhydre	1,6
Solution azotée	0,3
Nitrate de calcium ($Ca(NO_3)_2$)	0,2

(Adaptation d'un article de E.G. Beauchamp et G.W. Thurtell, Université de Guelph)

Formation d'oxyde nitreux

L'oxyde nitreux peut apparaître à deux étapes du cycle de N : pendant la nitrification (conversion de NH_4^+ en NO_3^-) et pendant la dénitrification (conversion de NO_3^- en N_2 gazeux). Ces deux processus sont assurés par des bactéries qui vivent dans le sol.

Nitrification

La majeure partie de l'azote qui pénètre dans le sol se trouve sous forme de NH_4^+ ou sous une forme qui peut être convertie en NH_4^+. Par exemple le N contenu dans les résidus de cultures provient en grande partie de substances

organiques (comme les protéines) dont la décomposition libère du NH_4^+. De la même façon, la plupart des engrais azotés en usage au Canada contiennent du NH_4^+ ou des substances (comme l'urée) qui se transforment en NH_4^+ peu après l'épandage. La plus grande partie de l'azote qui est ajoutée au sol subit ce processus.

Lors de la nitrification, la plus grande partie du N est transformée en nitrate (NO_3^-) mais une petite proportion (habituellement moins de (1 %) l'est sous forme de N_2O (tableau 11) :

N organique → NH_4^+
Engrais → NH_4^+ → NO_3^-
↑ N_2O

De façon générale, plus on ajoute de NH_4^+, plus la nitrification est élevée et plus le risque de libération de N_2O est important. Mais la proportion d'azote qui est dégagée sous forme de N_2O n'est pas fixe; en présence d'une bonne aération et de grandes quantités de NH_4^+, par exemple, la proportion de N qui devient du N_2O est moins importante que si les concentrations de NH_4^+ ou d'oxygène sont faibles. Par conséquent, les volumes de N_2O qui sont produits lors de la nitrification peuvent ne pas être proportionnels à la quantité de N qui subit le processus.

Dénitrification

Si la pénétration de l'oxygène dans le sol est restreinte, le nitrate (NO_3^-) peut être réduit en azote gazeux (N_2) par le processus appelé dénitrification. Lorsqu'elles sont privées d'oxygène, certaines bactéries consomment du NO_3^- et libèrent alors du N_2. Cependant, comme dans le cas de la nitrification, une petite partie du NO_3^- peut être libérée sous forme de N_2O :

N_2O
↓
NO_3^- → N_2

Le taux de dénitrification est déterminé par trois principaux facteurs : la quantité d'oxygène, la concentration de NO_3^- et la quantité de carbone assimilable (qui est la source d'énergie des bactéries). Les taux de dénitrification les plus élevés s'observent lorsque les trois conditions suivantes sont réunies : peu d'oxygène, beaucoup de NO_3^- et beaucoup de carbone assimilable. En l'absence de l'un ou l'autre de ces facteurs, le taux de dénitrification peut devenir négligeable. Comme cette réaction ne se produit qu'en l'absence d'oxygène, c'est dans les sols gorgés d'eau qu'elle est la plus intense. Une certaine dénitrification peut également avoir lieu dans les nodules des racines des légumineuses.

Cependant, la quantité de N_2O qui est libérée dépend non seulement du taux de dénitrification, mais aussi du rapport entre les volumes de N_2O et de N_2 qui sont produits. Ce rapport est extrêmement variable et tend à être plus faible lorsque les conditions permettent de forts taux de dénitrification.

On a parfois tendance à ne penser qu'à la dénitrification qui a lieu dans les champs cultivés, mais l'azote qui s'échappe du sol peut également être converti en N_2 ou en N_2O. Par exemple, le NO_3^- qui a quitté le sol par lessivage finit par se retrouver dans la nappe d'eau souterraine ou dans les sédiments des cours d'eau et des lacs, où il peut aussi subir la dénitrification. Par conséquent, il se peut que les quantités totales de N_2O produites par l'activité agricole soient beaucoup plus élevées que celles qui proviennent directement du sol.

Des deux réactions décrites ci-dessus, la dénitrification est probablement une source de N_2O plus importante que la nitrification sur les terres agricoles canadiennes. Les émissions de N_2O produites par la dénitrification peuvent être plusieurs fois supérieures à celles provenant de la nitrification, mais il est difficile de distinguer ces deux sources et leur importance relative varie énormément selon les endroits.

Pratiques de gestion influant sur les émissions d'oxyde nitreux

Dans les sols agricoles, le cycle naturel du N est perturbé par les apports de fertilisants azotés; dans ce cas, les taux d'émission de N_2O sont donc supérieurs à ceux de sols comparables portant une végétation naturelle. Par exemple, dans un champ d'orge situé près de Québec auquel on avait ajouté de l'engrais, on a relevé des émissions de N_2O allant jusqu'à 7 kg d'azote par hectare par an alors que les quantités produites par un sol forestier voisin étaient négligeables (0,04 kg de N par hectare). Mais le taux d'émission dépend beaucoup de l'état du sol; souvent les émissions peuvent être inexistantes et dans d'autres cas il se peut que la production N_2O soit importante. Par l'influence qu'elles exercent sur l'état du sol, les pratiques agricoles peuvent donc avoir un effet prononcé sur la production de N_2O.

Formes d'engrais

Au Canada, les producteurs agricoles utilisent divers types d'engrais commerciaux (tableau 11). Parmi ceux-ci, les plus communs sont l'urée et l'ammoniac anhydre (ammoniac gazeux sous pression), qui comptent pour près de 75 % du total de l'azote employé à cette fin. La plupart des engrais contiennent de l'azote soit sous forme de NH_4^+, soit sous une forme qui devient du NH_4^+ après l'épandage. Par exemple, l'ammoniac anhydre réagit immédiatement avec l'eau du sol en donnant du NH_4^+ alors que l'urée est convertie en NH_4^+ et en CO_2 en quelques jours par les enzymes du sol. Ensuite, une plus grande partie du NH_4 subit le processus de nitrification (conversion en NO_3^-), qui risque de donner lieu à des pertes par la production de N_2O.

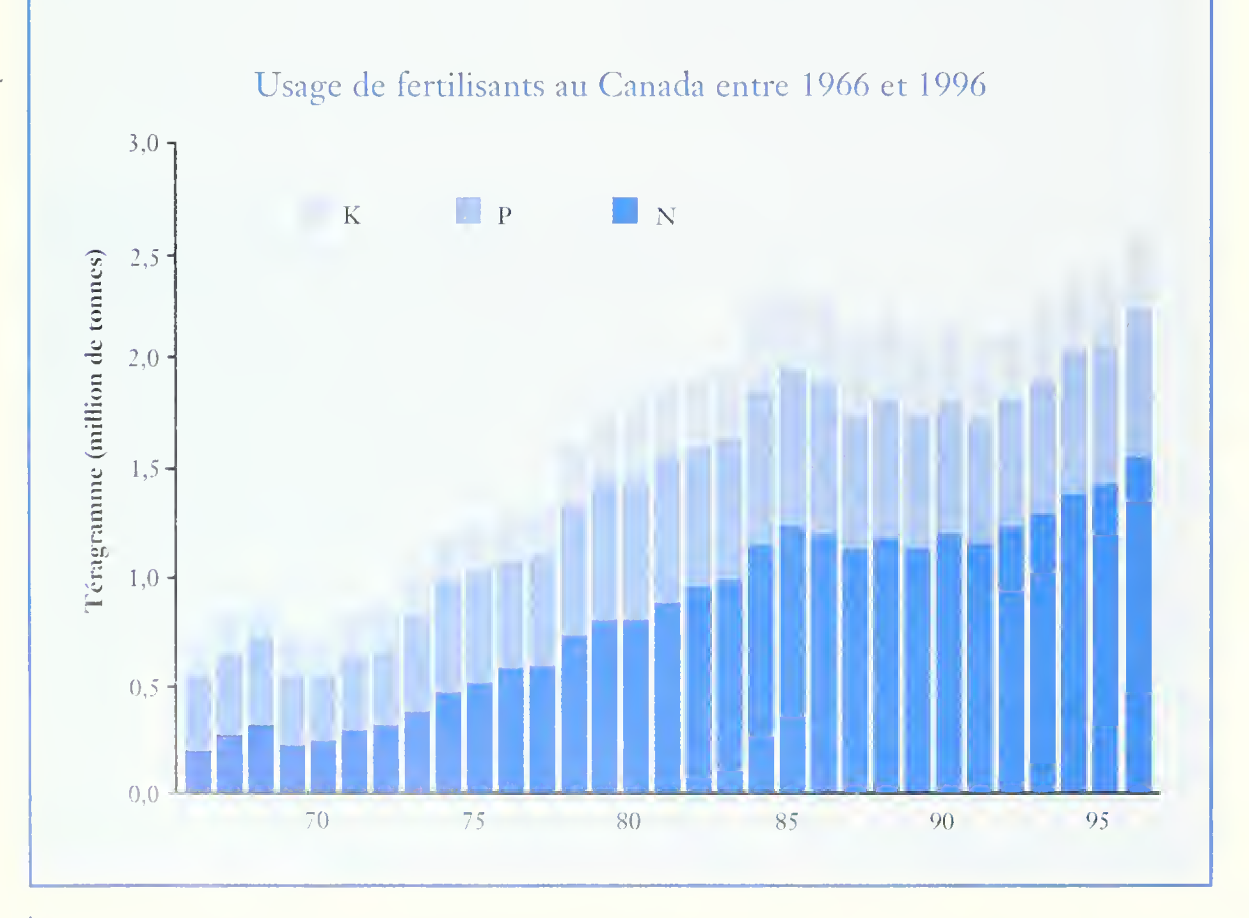
Lorsqu'ils subissent leurs premières réactions chimiques, les engrais peuvent influencer le pH, la teneur en C soluble et d'autres propriétés du sol situé dans leur voisinage immédiat. Ces effets, et donc les quantités de N_2O produites au cours de la nitrification, varient selon la forme d'engrais employée. Certaines recherches permettent même de penser qu'il pourrait y avoir de grandes différences entre les émissions de N_2O produites par les diverses formes d'engrais. Les émissions les plus fortes proviendraient de l'ammoniac anhydre et les plus faibles du nitrate de calcium, peut-être parce que dans ce dernier cas l'azote ne subit aucune nitrification.

Dans le cadre d'une recherche effectuée à Elora, en Ontario, on a comparé les quantités d'oxyde nitreux émises par

Usage de fertilisants au Canada

De 1930 à 1960, la production mondiale d'azote, de phosphate et de potasse n'a guère varié. Depuis 1960, l'utilisation de ces trois nutriments s'est grandement accrue. Puisque dans le cas des fertilisants azotés l'augmentation a été plus rapide. Le Canada utilise environ 2 % de la totalité des fertilisants consommés à l'échelle mondiale.

Comme partout ailleurs au monde, l'utilisation de fertilisants s'est largement accrue au Canada depuis les années 1960, principalement l'utilisation de fertilisants azotés dans les Prairies. Dans l'est du Canada, l'utilisation de fertilisants s'est stabilisée ou a même diminué au cours de la dernière décennie. En comparaison des autres pays développés, le taux d'épandage de fertilisants par hectare est faible au Canada.



Sélection du fertilisant

On sélectionne un fertilisant en fonction de sa commodité et de son coût.

Parmi les facteurs de commodité, on compte :

- la teneur en nutriments
- les exigences relatives à la machinerie, à la formation et à l'entretien
- la sécurité
- la facilité de transport et d'épandage
- les effets secondaires sur l'acidité du sol
- la possibilité de combinaison avec d'autres opérations (irrigation, arrosage, ensemencement).

Parmi les facteurs économiques, on compte :

- le coût par rapport à d'autres préparations
- la valeur de la culture
- l'efficacité d'utilisation par culture.



Besoins en azote des cultures

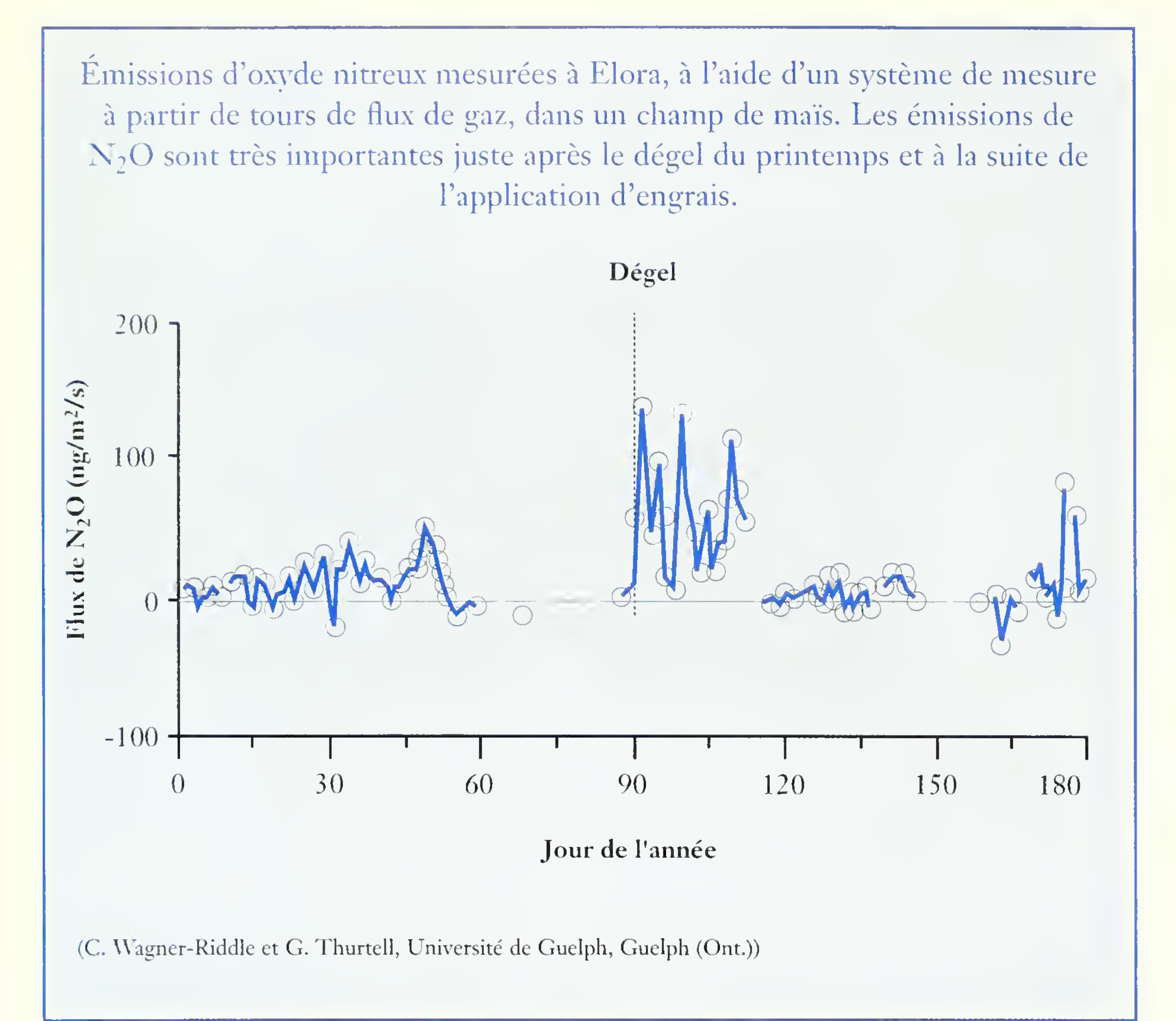
L'azote est le nutriment dont les cultures non légumineuses, comme le blé ou le maïs, ont le plus besoin pour croître. Dans le cas des légumineuses cultivées, comme la luzerne ou le soja, une certaine quantité d'azote est tirée du sol, mais la plus grande partie provient de la fixation biologique. Les fertilisants synthétiques et le fumier constituent d'autres sources d'azote. Les résidus de luzerne qui restent après le labourage ou le brûlage chimique peuvent aussi constituer une source importante d'azote pour la culture suivante.

Le taux optimal d'épandage de fertilisant ou de fumier dépend des besoins de la culture en azote supplémentaire, du rendement prévu et de la disponibilité de l'azote provenant d'épandages antérieurs de fumier ou de résidus de cultures légumineuses. La capacité de fournir de l'azote aux cultures varie beaucoup d'un sol à l'autre. En général, on utilise des données sur la réponse aux apports d'azote observée précédemment pour prévoir la quantité d'azote nécessaire. Mais on peut aussi effectuer des tests sur les sols.

L'épandage de fumier ou d'un fertilisant azoté peut entraîner, chez les cultures non légumineuses, un accroissement du rendement pouvant atteindre 50 %. Toutefois, le taux d'épandage ne devrait pas excéder celui qui entraînera un profit maximum, ce qui se produit normalement à environ 95 % du rendement maximum. Au taux d'épandange correspondant au profit maximum, l'azote sera utilisé efficacement mais, aussi, de la façon la plus rentable qui soit.



(E. Beauchamp, Université de Guelph, Guelph, (Ontario))



Émissions d'oxyde nitreux mesurées à Elora, à l'aide d'un système de mesure à partir de tours de flux de gaz, dans un champ de maïs. Les émissions de N_2O sont très importantes juste après le dégel du printemps et à la suite de l'application d'engrais.

(C. Wagner-Riddle et G. Thurtell, Université de Guelph, Guelph (Ont.))

différents types d'engrais. Sur du gazon, on a procédé à l'épandage d'azote en quantités équivalentes sous différentes formes : nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), urée ($CO(NH_2)^2$) et urée à libération lente. L'urée à libération lente a produit des émissions de N_2O peu importantes, probablement parce que le dégagement d'azote était graduel et coïncidait avec l'assimilation par les plantes, ce qui empêchait l'accumulation de NH_4^+ ou de NO_3^-. Dans les deux autres cas on a observé une production significative de N_2O, un peu plus élevée pour l'ammonium que pour l'urée.

La forme physique et le mode d'épandage des engrais peut également influer sur la quantité de N_2O qui est émise. Les résultats d'une étude faite en laboratoire permettent de penser que les gros granulés produisent des émissions plus importantes que de fines particules mêlées au sol. L'engrais plus finement divisé se disperse mieux dans le sol et chacune des particules modifie moins le pH dans son voisinage immédiat. Dans le même ordre d'idées, l'épandage en bandes a pour effet de concentrer l'azote dans des secteurs réduits et pourrait donc avoir un effet sur les émissions de N_2O.

Ces résultats et ceux d'autres études semblent indiquer que la forme d'engrais et le mode d'épandage ont un effet sur les émissions de N_2O, mais cet effet n'a pas encore été totalement compris. Comme les quantités de N_2O produites dépendent aussi d'autres facteurs tels que les quantités ajoutées à chaque épandage, les propriétés du sol, le moment des précipitations et le type de rotation des cultures, il est possible que la forme de l'engrais employé n'ait pas le même effet dans tous les cas.

Gestion des fumiers

De tout l'azote consommé par le cheptel dans son fourrage, la proportion qui est excrétée sous forme d'urine et de fumier peut atteindre 78 %. Par exemple, une vache laitière peut excréter 100 kg de N par an ou même plus. Les fumiers sont donc très riches en azote; au Canada, les quantités excrétées par le cheptel chaque année pourraient être voisines de celles qui sont ajoutées aux cultures sous forme d'engrais.

Une partie de l'azote présent dans les fumiers se perd dans l'atmosphère sous forme de NH_3 soit immédiatement, soit au cours de l'entreposage, mais la plus grande partie retourne dans le sol. La teneur en azote des fumiers dépend de l'espèce considérée, de l'alimentation de l'animal et du type de litière, mais elle se situe habituellement aux environs de 2 % du poids sec. Cet azote se présente principalement sous deux formes qui sont le NH_4^+ et l'azote organique. Le NH_4^+ est directement assimilable par les plantes et se comporte dans le sol comme celui qui provient des engrais. L'azote organique, quant à lui, a une action qui s'apparente plus à celle des engrais à libération lente puisqu'il se transforme peu à peu en NH_4^+ sous l'action des micro-organismes du sol.

L'azote contenu dans le fumier qui est ajouté au champ est susceptible de se perdre sous forme de N_2O. Comme une partie importante du N se trouve sous forme de NH_4^+, la transformation en NO_3^- par nitrification risque de faire apparaître du N_2O; cependant la dénitrification peut en libérer des quantités nettement plus importantes parce que le fumier, en plus de l'azote, contient du carbone assimilable. L'épandage simultané de fortes concentrations de C assimilable et de N favorise la dénitrification. Dans des cas extrêmes de sols ayant reçu des quantités excessives de fumier pendant de nombreuses années consécutives, les émissions de N_2O peuvent atteindre 50 kg de N par hectare par an, bien qu'elles soient habituellement beaucoup plus faibles.

Les quantités de N_2O libérées par les sols ayant reçu du fumier dépendent à la fois de la méthode d'épandage et des quantités considérées, du type de fumier et des caractéristiques du sol. Les résultats d'une étude permettent de penser que les émissions suivant l'épandage de fumier liquide par bandes pourraient être supérieures à celles résultant d'un épandage uniforme sur toute la surface du sol. L'épandage en bandes a pour effet de concentrer le N et le C, ce qui favorise la dénitrification.

La gestion des fumiers peut également avoir des effets indirects sur les émissions de N_2O. Une grande proportion de l'azote excrété par le bétail, qui atteint parfois 50 %, peut être libérée dans l'atmosphère sous forme d'ammoniac (NH_3); ce gaz finit par se déposer sur le sol ou dans l'eau et par se transformer à nouveau en NH_4^+, qui peut à son tour se perdre sous forme de N_2O tout comme l'azote ajouté directement par épandage.

Ajout de résidus de récoltes et gestion des sols

Tous les ans, les sols reçoivent de grandes quantités d'azote sous forme de résidus de récolte (p. ex. paille, racines) et d'autres matières végétales. Cet apport est souvent un simple recyclage de l'azote absorbé auparavant dans les mêmes sols. Cependant, les légumineuses, qui fixent le N_2 de l'air, peuvent enrichir les sols en nouvelle matière azotée. Des plantes sont parfois cultivées uniquement dans ce but et enfouies par labourage (« engrais verts »).

Le volume de N_2O provenant de l'ajout de nouvelles matières végétales dépend du taux de libération de N. Certains types de résidus comme les pailles de blé et les tiges de maïs ont une faible teneur en azote, souvent inférieure à 0,5 %, et leur décomposition en libère peu; il arrive même dans ce cas que les quantités de NH_4^+ ou de NO_3^- présentes dans le sol diminuent parce que les microbes ont besoin d'un supplément d'azote pour jouer leur rôle de décomposeurs.

Injection de lisier liquide

L'injection de lisier liquide dans les sols prévient le rejet rapide des composés azotés dans l'air et réduit au minimum le dégagement d'odeurs désagréables. Si on ameublit le sol en même temps, on brise les fissures profondes dans le sol, et le liquide ne s'écoulera pas directement dans les tuyaux d'argile. Comme les citernes à lisier sont très lourdes et provoquent un compactage des sols humides comme celui observé au début du printemps, il est souvent difficile de déterminer quand il convient de procéder à une telle opération.



Tableau 12 Comparaison des émissions de N_2O dans le centre de l'Alberta, en fonction de la façon culturale

	N (kg/ha)	
	1993–1994	1994–1995
Labour /avec fertilisation	1,7	2,5
Labour/sans fertilisation	0,6	2,4
Sans labour /avec fertilisation	1,7	0,9
Sans labour /sans fertilisation	0,6	0,4

(R. Lemke, Université de l'Alberta)

Par contre, la décomposition de matières riches en azote, comme les résidus de légumineuses ou les engrais verts, peut dégager de grandes quantités de NH_4^+ (qui est ensuite converti en NO_3^-). Comme le fumier d'origine animale, ces matières sont une bonne source de carbone assimilable, ce qui favorise la production de N_2O par dénitrification. Par exemple, la production émanant des résidus de luzerne peut atteindre 2 à 4 kg de N_2O–N par hectare par an, et celle des résidus de soya 0,3 à 2 kg.

Le mode de gestion des résidus de cultures peut également avoir une influence sur les émissions de N_2O. Le labour représente peut-être le principal outil de gestion de ces matières. Normalement, les résidus de récoltes sont enfouis par le labour, mais dans les systèmes de culture sans labour ou de culture minimale, ils restent sur le sol, ce qui modifie le processus de décomposition. Certaines études permettent de penser que les cultures sans labour ont pour effet d'accroître les émissions de N_2O, mais d'autres concluent qu'elles peuvent les faire diminuer (tableau 12). Il semble que l'effet du labour sur les émissions de N_2O dépende du type de sol, du système de culture, du climat et d'autres facteurs. En plus de modifier la répartition des résidus, le type de labour influe aussi sur le degré d'humidité du sol, sa température et son aération, autant de paramètres qui se répercutent à leur tour sur la production de N_2O.

La matière organique contenue dans les sols peut produire du N_2O même en l'absence d'apports récents de résidus ou d'azote sous d'autres formes. Comme ils renferment de grandes réserves d'azote organique, les sols organiques peuvent émettre de grandes quantités de N_2O (environ 5 kg de N par hectare par an). De même, les sols qui n'ont produit aucune récolte pendant une année (pratique dite de la « jachère ») peuvent libérer de grandes quantités de N_2O. Les microbes qu'ils abritent dégradent peu à peu l'azote organique en le transformant en NH_4^+ et en NO_3^-, et comme il n'y a aucune plante en cours de croissance qui puisse prélever cet azote, celui-ci s'accumule et a de bonnes chances de se perdre par dénitrification.

Épandage de matières azotées, quantités et chronologie

On suppose souvent que la production de N_2O est proportionnelle aux quantités d'azote qui ont été ajoutées au sol. Mais il est possible qu'elle dépende davantage des quantités qui n'ont pas été utilisées par les plantes. Si l'on synchronise précisément la libération de NH_4^+ ou de NO_3^- dans le sol avec leur absorption par les plantes, on empêche cet azote de s'accumuler, et les pertes par émission de N_2O seront minimes. Mais il est rare qu'on observe une correspondance aussi parfaite. Les quantités de NH_4^+ et surtout de NO_3^- qui s'accumulent dépassent souvent la capacité d'absorption des plantes, d'où de forts risques de perte d'azote par lessivage ou par dénitrification. Cela se vérifie en particulier si le NO_3^- s'accumule après la récolte parce qu'il est alors exposé à la dénitrification qui a lieu en automne et en hiver et qui est particulièrement intense au printemps suivant. Par conséquent, la synchronisation des apports d'azote et l'ajustement des quantités ajoutées avec l'absorption par les plantes constituent un important outil de gestion pour la réduction des émissions de N_2O.

Niveau des émissions d'oxyde nitreux

Les émissions d'oxyde nitreux sont habituellement sporadiques. Contrairement au CO_2 qui est libéré du sol de façon presque continue, le N_2O apparaît souvent sour forme d'émissions intermittentes. Au Canada, les plus importantes émissions de ce type peuvent se produire au début du printemps, à la fonte des neiges. Dans un site du centre de l'Alberta, par exemple, la plus grande partie du N_2O produit pendant toute l'année a été émise pendant une période de 10 jours à la fin du mois de mars (fig. 22). Ces émissions de N_2O reflètent peut-être des conditions favorables à la dénitrification et à la production de N_2O, c'est-à-dire une forte teneur en eau (manque d'oxygène), des quantités suffisantes de NO_3^- et de C assimilable ainsi qu'une température adéquate. Il est également possible qu'elles marquent le dégagement soudain du N_2O qui était jusque-là emprisonné sous une couche de sol gelé ou de glace. Bien que les émissions du printemps soient souvent les plus importantes, on observe fréquemment d'autres émissions de N_2O après de fortes pluies qui détrempent les sols, surtout dans les parties basses. Après un épandage d'engrais, les quantités d'azote devenues disponibles peuvent également provoquer la libération soudaine de N_2O.

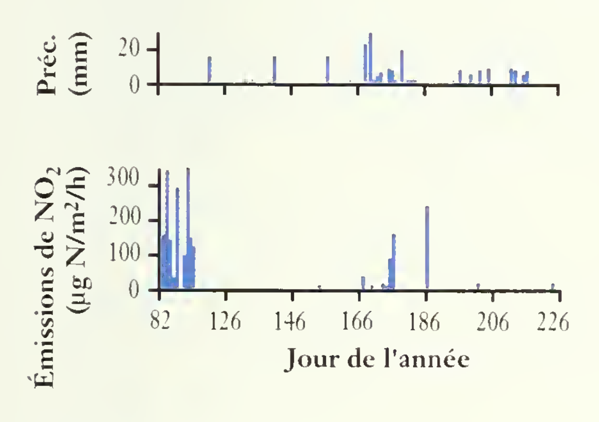


Figure 22

Précipitations et émissions saisonnières d'oxyde nitreux mesurées à Ellerslie (Alberta), en 1993, à l'aide de capteurs montés sur des tours surplombant un champ de blé fertilisé. (R. Lemke, Université de l'Alberta)

Émissions d'oxyde nitreux durant l'hiver

Dans l'est du Canada, où les sols peuvent être recouverts de neige pendant des périodes pouvant atteindre 5 mois, la saison de culture est relativement courte. On a déjà pensé que les émissions de N_2O durant l'hiver étaient mineures et comptaient peu dans le bilan annuel de N. On sait maintenant que des pertes non négligeables d'azote sous forme de N_2O surviennent sous la couverture de neige. Dans certains cas, les sols libèrent des quantités importantes de N_2O au cours de l'hiver. Les cycles gel-dégel influent aussi sur les émissions de N_2O par les sols. Ces cycles provoquent des changements physiques et biologiques dans le sol; ils perturbent la structure du sol et stimulent la dénitrification, ce qui entraîne une production accrue de N_2O.



(E. van Bochove, AAC)

Les émissions de N_2O sont sporadiques non seulement dans le temps mais aussi dans l'espace. Ces variations découlent en partie des différentes teneurs en N et en humidité (donc en oxygène) des divers sols. À un moment donné, la plus grande partie d'un champ peut émettre très peu de N_2O alors qu'on observe de fortes émissions en provenance de « points chauds » d'étendue limitée où les conditions se prêtent parfaitement à la production de N_2O.

Une autre difficulté découle du fait qu'une grande partie du N_2O est souvent produite dans les couches profondes du sol. La libération de ce gaz

dépend donc de sa vitesse de diffusion vers la surface, vitesse qui est elle-même déterminée par la porosité du sol et la présence éventuelle de glace ou d'eau à la surface. Le N_2O qui est emprisonné peut également se dissoudre dans l'eau du sol ou encore être converti en N_2 ou en NO_3^- par l'activité microbienne; l'oxyde nitreux qui se forme en profondeur n'est donc pas entièrement rejeté dans l'atmosphère. Par conséquent, les émissions du N_2O en provenance des sols dépendent non seulement de sa vitesse de formation mais également de sa vitesse de diffusion ou de conversion en d'autres formes.

Jusqu'à récemment, on pensait qu'en hiver la température des sols ne permettait qu'une production limitée de N_2O, mais ce n'est peut-être pas le cas là où la neige agit comme isolant. Dans certaines régions de l'est du Canada, par exemple, le sol peut être couvert jusqu'à 5 mois par année d'une épaisse couche de neige qui le maintient à une température voisine du point de congélation ou supérieure à celui-ci. Le N_2O peut donc être produit pendant tout l'hiver et s'échapper à travers la neige poreuse. Dans un site près de Québec, dans un champ d'orge fertilisé et labouré l'automne précédent, on a observé des émanations pouvant atteindre 5 kg de N par hectare au cours de l'hiver et du printemps, soit 5 à 10 % de l'azote ajouté avec l'engrais. Le même champ ne produisait que 2 kg de N au cours de la saison de croissance.

Étant donné la nature sporadique et imprévisible de la production de N_2O, il est difficile d'en évaluer l'importance. Par conséquent, les estimations des quantités émises sont probablement moins fiables que celles qui portent sur les autres gaz à effet de serre.

Tableau 13 Estimation des sources d'émission directe et indirecte de N_2O par l'industrie agricole au Canada en 1996

Province	Émissions directes par les sols	Émissions directes par le fumier	Émissions indirectes	Émissions totales de N_2O
	(Gg de N_2O)			
Provinces atlantiques	0,9	0,5	1,0	2,4
Québec	5,7	2,4	4,0	12,1
Ontario	13,1	3,7	6,0	22,8
Manitoba	10,6	2,3	5,7	18,6
Sask.	19,1	4,5	9,2	32,8
Alberta	18,4	9,6	10,8	38,8
C.-B.	1,9	1,5	1,5	4,9
Canada	69,7	24,5	38,2	132

(R.L. Desjardins, AAC)

Évaluation des émissions d'oxyde nitreux à l'échelle nationale

Étant donné la connaissance limitée que l'on a de la production et de la libération de N_2O, toute évaluation des quantités émises par l'activité agricole canadienne revêt nécessairement un caractère hypothétique. Les estimations actuelles se fondent sur des équations simples élaborées par le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui permettent de calculer le volume d'oxyde nitreux provenant de trois sources : les émissions directes produites par les sols, les émissions directes dues au bétail et les émissions indirectes produites par l'activité agricole.

Les émissions directes provenant des sols comprennent le N_2O dégagé par les engrais, les fumiers ajoutés aux terres, les légumineuses et les résidus de cultures. Les chercheurs ont évalué la production attribuable au contenu total en azote de toutes ces sources en se fondant sur les statistiques nationales et en supposant qu'une proportion donnée de cet azote s'échappait sous forme de N_2O (aux environs de 1 %, selon la source), puis ils ont ajouté les quantités libérées par les

sols organiques, bien que celles-ci soient faibles. Selon leurs calculs, en 1996 les émissions directes de N_2O en provenance des sols agricoles du Canada se chiffraient à 70 Gg (milliers de tonnes) (tableau 13). Sur la superficie totale des terres cultivées au pays, ce chiffre représente une moyenne d'environ 1 kg d'azote par hectare par an. Cependant, selon cette évaluation, les taux d'émissions varient fortement d'une région à l'autre (fig. 23 a, b).

Les scientifiques ont calculé la production directe en provenance du bétail, en évaluant la quantité de N présente dans les fumiers et en supposant qu'une proportion donnée de cet azote était libérée sous forme de N_2O. Selon leur hypothèse, la proportion de N convertie en N_2O était de 2 % pour les animaux laissés au pâturage et de 0,1 à 2 % pour le reste du cheptel, suivant le mode de gestion des déchets. Cela leur a permis de chiffrer les émissions directes produites par le bétail en 1996 à 24,5 Gg (milliers de tonnes) de N_2O (tableau 13).

Figure 23a

Estimations des émissions directes de N_2O de sources agricoles dans l'Ouest canadien en 1991.

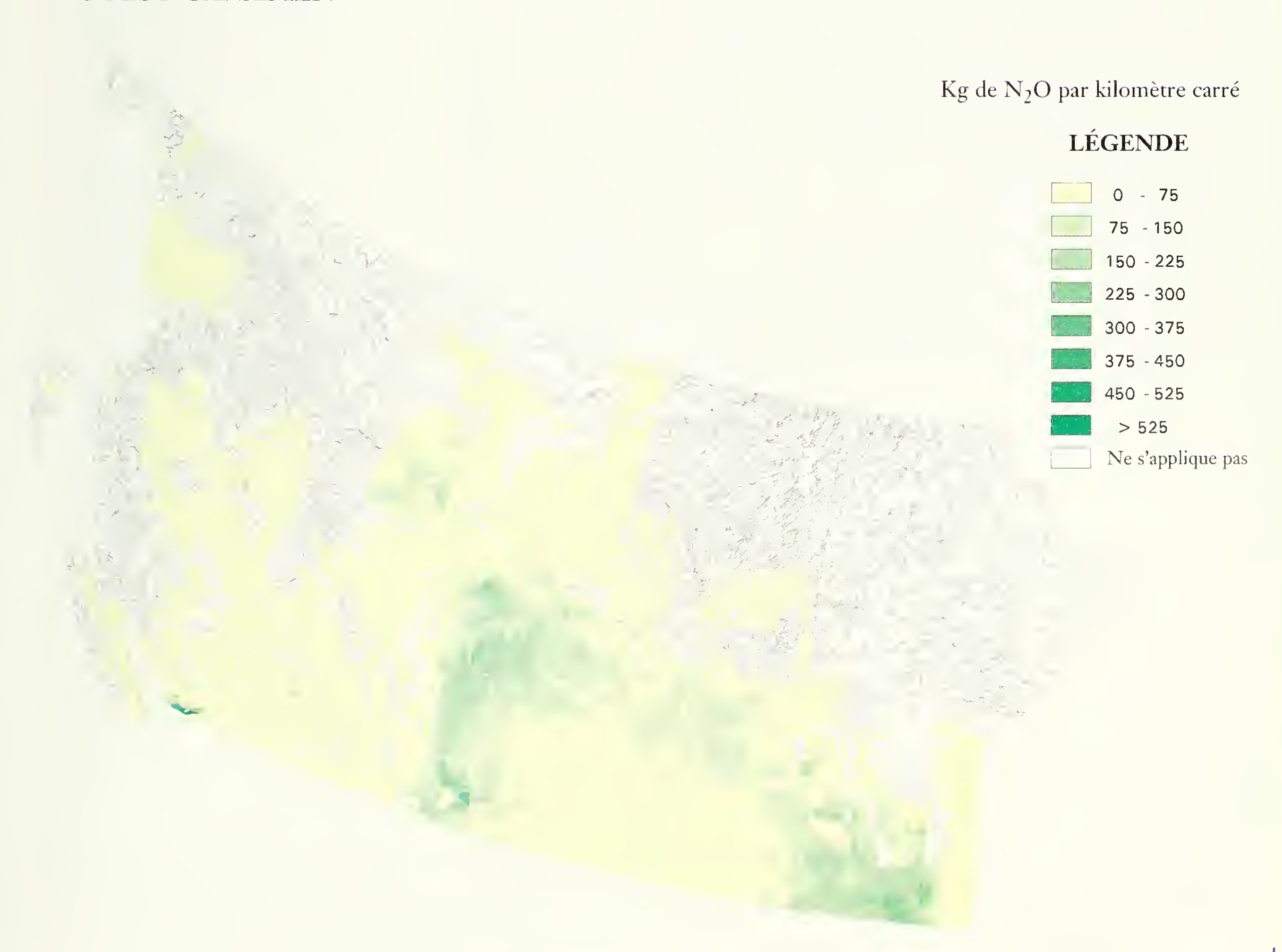
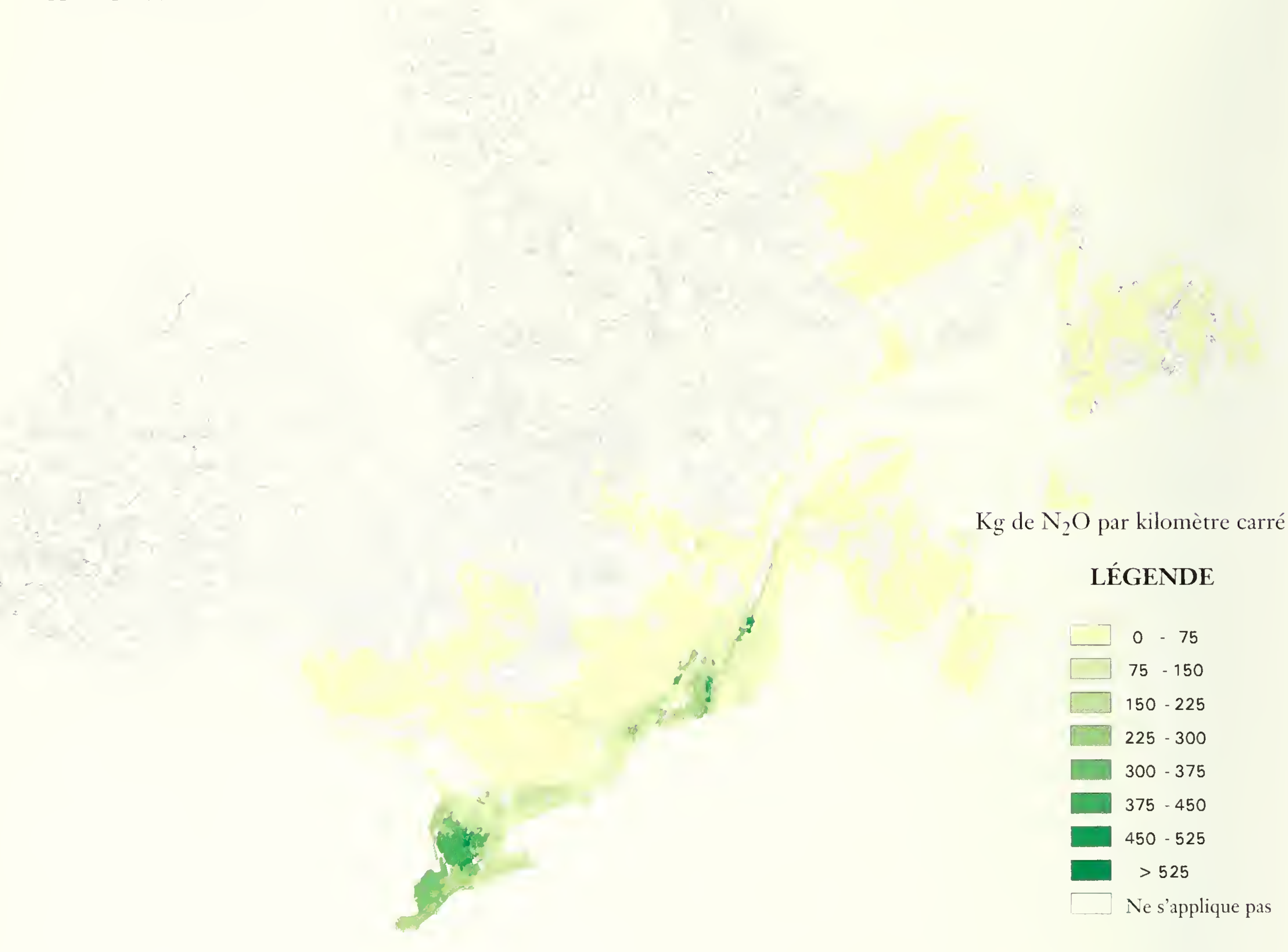


Figure 23b

Estimation des émissions directes de N_2O de sources agricoles dans l'Est du Canada en 1991.

EST CANADIEN



Ils ont également calculé les émissions indirectes à partir d'estimations des dépôts d'azote atmosphérique (p. ex. NH_3) sur le sol, des quantités de N s'échappant des champs par lessivage et de celles produites par les déchets humains. Selon ces calculs, le lessivage est la principale source de N_2O, soit plus de 80 % des quelque 38 Gg (milliers de tonnes) produits par des sources indirectes en 1996 (tableau 13). Pour les fins de cette évaluation, on a supposé que 30 % de l'azote contenu dans l'engrais ou le fumier épandu rejoignait les eaux souterraines par lessivage.

Selon les estimations du GIEC, en 1996 le total des émissions de N_2O résultant de l'activité agricole au Canada était d'environ 132 Gg (milliers de tonnes) (tableau 13), les émissions directes produites par les sols comptant pour environ la moitié de ce total.

La tendance des émissions de N_2O avec le temps revêt peut-être encore plus d'importance que le volume total. On estime actuellement que la production de

ce gaz a connu une progression constante depuis 1981, l'augmentation atteignant 20 % pendant la seule période allant de 1991 à 1996. Une grande partie de cette différence était due à l'épandage de plus grandes quantités d'azote sous forme d'engrais ou de fumier animal. On prévoit un accroissement du cheptel et du volume des récoltes au cours des prochaines années, ce qui pourrait entraîner un accroissement encore plus considérable des émissions de N_2O, à moins que les producteurs améliorent leur mode de gestion des matières azotées.

Effets combinés des trois gaz à effet de serre

Les trois gaz à effet de serre (CO_2, CH_4 et N_2O) ne produisent pas un réchauffement de même intensité. Par conséquent, pour comparer leurs effets relatifs, on exprime habituellement leurs émissions en « équivalents de CO_2 ». Un kilogramme de N_2O produit le même réchauffement qu'environ 310 kg de CO_2 (sur une période de 100 ans), et il vaut donc 310 équivalents de CO_2; de même, 1 kg de CH_4 représente 21 équivalents de CO_2.

Selon les meilleures évaluations et suivant les raisonnements exposés ici pour chacun des gaz, on estime qu'en 1996 les émissions produites par l'agriculture canadienne se chiffraient à 67 Tg (millions de tonnes) d'équivalents de CO_2 (tableau 14). Les deux tiers environ de ce total étaient attribuables au N_2O et le tiers au CH_4. En comparaison, la production nette de CO_2 était presque négligeable.

Lorsqu'on a chiffré les émissions de CO_2 venant de l'agriculture, on n'a pas tenu compte de la plus grande partie de celles causées par la consommation de combustibles fossiles pour la production des intrants, le fonctionnement des machines agricoles et le transport des produits. Ces sources, qui entrent dans l'inventaire des secteurs du transport et de la production industrielle, représentaient environ 25 Tg (millions de tonnes) de CO_2 en 1996.

Selon les évaluations actuelles, les quantités de gaz à effet de serre produites par l'agriculture sont en augmentation (tableau 14). En 2010, elles pourraient dépasser de 9 % celles de 1996 à moins que les producteurs adoptent de meilleures pratiques de gestion. Cet accroissement devrait résulter dans une large mesure de l'augmentation du cheptel et des épandages d'azote sous forme d'engrais ou de fumier. On s'attend à une

Potentiel de réchauffement du globe

Le potentiel de réchauffement du globe (PRG) constitue un moyen simple de comparer l'efficacité de divers gaz à effet de serre. Il aide les décideurs à comparer les effets de la réduction des émissions de CO_2 aux effets de la réduction d'un autre gaz à effet de serre, pendant une période donnée. Par exemple, une petite réduction des émissions de N_2O peut être aussi, sinon plus efficace qu'une réduction importante des émissions de CO_2.

Le potentiel de rétention de la chaleur d'un gaz dépend non seulement de sa capacité à absorber et à ré-émettre le rayonnement, mais aussi de la durée de ce processus. Les molécules de gaz se dissocient peu à peu ou réagissent avec d'autres composés atmosphériques pour former de nouvelles molécules possédant des propriétés radiatives différentes. Par exemple, le CH_4 a une durée de vie moyenne de 12 ans, le N_2O de 120 ans et le CO_2 de 200 ans. Sur une période de 20 ans, le CH_4 a un impact radiatif 56 fois plus élevé que celui du CO_2. Cependant, au fil des ans, une partie du CH_4 se décompose pour donner du CO_2 et du H_2O. Ainsi, sur une période de 100 ans, le CH_4 possède un potentiel de réchauffement du globe 21 fois plus élevé que celui du CO_2.

Les potentiels de réchauffement du globe sont donnés pour des périodes de 20, 100 et 500 ans. Dans le document *La santé de l'air que nous respirons*, on utilise les PRG sur 100 ans recommandés par le GIEC. Les calculs des potentiels de réchauffement sont continuellement améliorés; ils font donc l'objet d'une révision au fur et à mesure que s'améliorent nos connaissances sur ces phénomènes.

Potentiel relatif de réchauffement du globe (en équivalents de CO_2 par unité de masse du gaz)

	Période		
Gaz	20 ans	100 ans	500 ans
CO_2	1	1	1
CH_4	56	21	6,5
N_2O	280	310	170

Indicateurs agro-environnementaux

Un indicateur agro-environnemental est une mesure du changement, ou du risque de changement, dans les ressources environnementales utilisées ou touchées par l'agriculture. Ces indicateurs sont de portée nationale, mais ils tiennent compte des variations régionales. On est en train de mettre au point six indicateurs comprenant chacun plusieurs des éléments suivants :

Gestion des ressources agricoles :
fait un suivi de l'utilisation des techniques de gestion environnementalement durables, en mesurant les résidus sur les sols et en gérant les terres agricoles, les fertilisants, les pesticides et le fumier.

Risque de dégradation des sols :
mesure les progrès réalisés en matière de réduction de la vulnérabilité des sols agricoles à la dégradation, et indique quels sols sont encore fortement susceptibles à l'érosion, à la salinisation ou à la perte de matière organique.

Risque de contamination des eaux :
évalue les progrès réalisés en matière de réduction du risque de contamination des eaux par les nutriments utilisés en agriculture, et indique quelles sont les zones à risque.

Bilan des gaz à effet de serre dans les agroécosystèmes :
évalue les tendances des émissions nettes de CO_2, de N_2O et de CH_4.

Changement dans la biodiversité des agroécosystèmes :
contrôle la biodiversité des écosystèmes agricoles, en mesurant les changements dans la disponibilité des habitats et dans la diversité et l'abondance des espèces.

Efficacité des produits utilisés :
mesure l'efficacité des fertilisants, des pesticides, de l'énergie et des eaux d'irrigation utilisés par les agriculteurs, afin de détecter les effets éventuels sur l'environnement.

(T. McRae, AAC)

Tableau 14 Estimation des émissions totales de gaz à effet de serre par les agroécosystèmes au Canada

	1981	1986	1991	1996	2000*	2005*	2010*
	(Tg d'équivalents de CO_2)						
CO_2	9	7	5	3	1	0	0
CH_4	22	20	20	23	23	24	25
N_2O	32	33	34	41	43	45	48
Total	63	60	59	67	67	69	73

* Prévues en utilisant un scénario de croissance moyenne jusqu'en 2007, d'après CRAM. Toutes les données pour 2010 suivent un ajustement optimal de la tendance de 1993 à 2007, d'après CRAM. Toutes les données sur les fertilisants ont été prévues en utilisant un ajustement optimal de la tendance des données de recensement de 1981, 1986, 1991 et 1996. Toutes les populations de moutons, de poulets et de dindons ont été prévues en utilisant un ajustement optimal de la tendance des données de recensement.

(R.L. Desjardins, AAC)

diminution des émissions de CO_2, qui ne devrait cependant pas suffire à compenser les augmentations prévues pour les autres gaz.

À l'avenir, les quantités émises dépendront de l'évolution des pratiques agricoles, qui est difficile à prévoir. Le nombre de têtes de cheptel, les types de cultures et d'engrais ainsi que le mode de gestion des fumiers sont tous sujets à des changements très rapides qui peuvent invalider les meilleures projections dont on dispose actuellement.

Incertitudes sur les évaluations actuelles

Les évaluations actuelles concernant la production de gaz à effet de serre ne sont pas exemptes d'incertitudes. Le calcul des volumes en provenance d'écosystèmes aussi étendus et divers que les terres agricoles canadiennes se heurte à de nombreuses difficultés. On ne comprend même pas encore tous les processus qui influent sur les émissions, et il faut donc reconnaître que chacune des quantités calculées est entachée d'une certaine erreur. Le N_2O est celui des trois gaz pour lequel l'incertitude est la plus grande (fig. 24), l'erreur pouvant atteindre ou même dépasser 50 % dans ce cas. Cependant, les chiffres présentés ici constituent la première évaluation exhaustive des quantités de gaz à effet de serre produites par l'agriculture canadienne, et ils constitueront un point de référence lorsqu'on voudra établir des tendances.

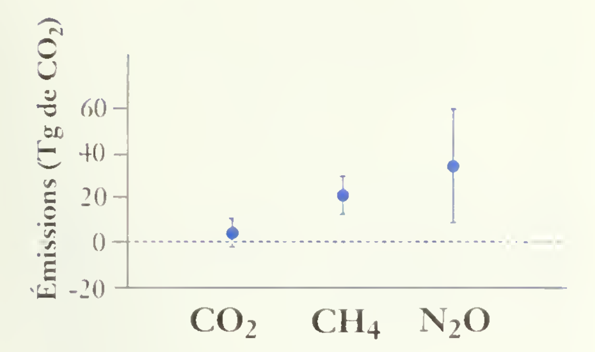


Figure 24

Estimation des émissions de CO_2, de CH_4 et de N_2O en équivalents de CO_2 découlant des activités agricoles au Canada et incertitudes relatives pour chaque gaz.

Bien qu'elles soient valables selon une première approximation, ces évaluations seront probablement modifiées au fur et à mesure de l'évolution de nos connaissances. Les recherches en cours nous permettront de mieux connaître les mécanismes d'émission et, à partir de là, de bâtir de meilleurs modèles. Grâce aux nouvelles techniques de mesure simultanée des trois gaz au-dessus de grandes étendues, on pourra aussi mieux cerner la fiabilité de ces mêmes modèles. On devrait donc disposer d'estimations plus précises à l'avenir, mais il n'est pas nécessaire d'attendre jusque-là pour tenter de réduire les émissions actuelles.

Population de porcs au Canada

Les émissions futures de gaz à effet de serre dépendent des tendances économiques. Par exemple, on a estimé à l'aide du modèle canadien agricole régional (modèle CRAM) que la population de porcs au Canada atteindra 14 millions en 2010, soit une hausse de 36 % par rapport à celle en 1990. Cette augmentation pourrait entraîner un accroissement important des émissions de N_2O et de CH_4 à partir du fumier. Les porcs sont les deuxièmes plus importants producteurs de fumier par 1000 kg d'animaux vivants par jour, ce qui équivaut à une production de 10 kg de CH_4 par animal par année. La quantité de CH_4 émise par le fumier de porc en 2010 sera, estime-t-on, d'environ 143 Gg (milliers de tonnes), soit une hausse de 25 Gg par rapport à 1996.



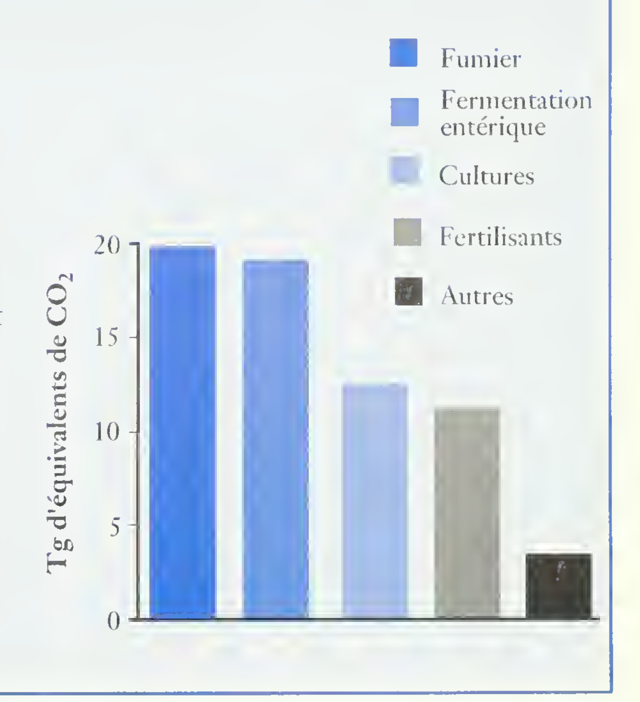
Techniques permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre

L'agriculture est actuellement un producteur net de gaz à effet de serre. De plus, on prévoit actuellement une augmentation des quantités libérées, à moins qu'il y ait évolution des pratiques agricoles. Heureusement, les agriculteurs peuvent prendre un certain nombre de mesures pour réduire les émissions. Certaines de ces mesures seraient coûteuses mais d'autres peuvent être mises en œuvre à peu de coûts et même engendrer des profits. La généralisation de ces pratiques permettrait de réduire

Émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole

En 1996, le secteur agricole produisait environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique au Canada. En utilisant le potentiel de réchauffement du globe, on a converti les principales sources de tous les gaz émis en équivalent de CO_2. Ce sont le fumier, la fermentation entérique, les cultures et les fertilisants qui constituent ces principales sources dans le secteur agricole.

(R.L. Desjardins, AAFC)



Mesure des gaz à effet de serre au-dessus des fermes

Les scientifiques cherchent maintenant des façons de mesurer les émissions de gaz à effet de serre pour des fermes en entier, par exemple à l'aide d'instruments emportés par un ballon captif gonflé à l'hélium, qui permettraient de mesurer les concentrations de gaz à effet de serre en fonction du temps et de l'altitude.

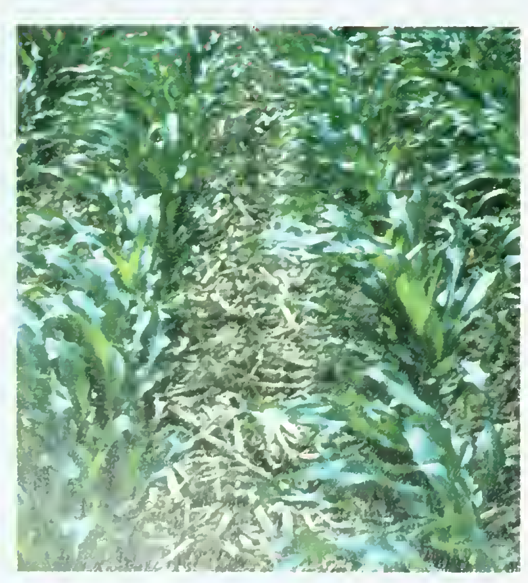


(E. Pattey, AAC)

Travail de conservation du sol

Travail de conservation du sol avant la plantation de pommes de terre à l'Île-du-Prince-Édouard. Travail réduit du sol dans un champ de maïs en Ontario et de blé en Saskatchewan.







les émissions des trois gaz à effet de serre et même de transformer les exploitations agricoles en absorbeurs nets de CO_2.

Réduction des émissions de dioxyde de carbone

L'agriculture est liée à la gestion du carbone. Chaque année, sur chaque hectare de terre agricole, un certain nombre de tonnes (Mg) de C sont prélevées dans l'atmosphère et transformées en matière organique par photosynthèse (fig. 8 et 9). Simultanément, la décomposition de la matière organique et la consommation des combustibles fossiles libèrent des quantités à peu près équivalentes de CO_2. Par le choix de leurs pratiques agricoles, les exploitants peuvent agir sur ce cycle en vue de réduire la quantité nette de CO_2 qui est ainsi libérée.

Il existe deux stratégies principales pour réduire les émissions : l'accroissement des volumes de carbone stockés dans le sol et la consommation de quantités moindres de combustibles fossiles. Il est d'ores et déjà possible d'adopter plusieurs pratiques allant dans ce sens.

Accroissement des réserves de carbone du sol

Dans les sols qui ont été traités de la même façon pendant de nombreuses années, la teneur en carbone est relativement constante. Cependant, un changement du mode de gestion peut entraîner des pertes ou des gains de C. Pour accroître la quantité de carbone présente dans le sol, on peut soit y ajouter de plus grandes quantités de C, soit ralentir la vitesse de décomposition (transformation en CO_2) de celui qui s'y trouve déjà (fig. 8 et 9).

Ajout de matière organique

Le CO_2 atmosphérique pénètre dans le sol par l'intermédiaire de la photosynthèse. Par ce processus, les plantes captent le dioxyde de carbone de l'air pour fabriquer des substances organiques dont une partie se retrouve dans le sol sous forme de résidus (ce qui comprend les racines). La seule façon de faire augmenter directement les apports en carbone consiste donc à favoriser la photosynthèse ou, autrement dit, à accroître le rendement végétal. Les agriculteurs y parviennent en choisissant des cultures et des variétés à haut rendement, en enrichissant le sol (épandage d'engrais et de fumiers) et en améliorant les apports d'eau (irrigation, économies d'eau ou drainage). Les pratiques qui améliorent la qualité du sol se traduisent également par des rendements plus élevés. L'aspect le plus important est peut-être le choix de cultures qui permettent aux plantes de se développer (et de faire de la photosynthèse) le plus longtemps possible sur les sols.

Mais l'accroissement de la photosynthèse ne permet d'accumuler du C dans le sol que si au moins une partie du supplément de carbone qui a été piégé retourne dans le sol. Le prélèvement d'une partie de la plante sous forme de grain ou d'autres produits réduit d'autant l'apport de carbone au sol. Par conséquent, on obtiendra de meilleurs gains en C si on laisse tous les résidus végétaux sur place ou si l'on produit des cultures (comme les herbacées fourragères) qui emmagasinent une grande partie de leur carbone dans leurs racines. Souvent, les animaux contribuent à ramener le carbone dans le sol. Dans de nombreux systèmes fondés sur l'élevage, une grande partie de la matière végétale finit par retourner dans le sol sous forme de fumier et seule une petite partie sort véritablement du champ ou du pâturage.

Ralentissement de la décomposition

La deuxième façon d'accroître les réserves de C est de réduire la vitesse de décomposition de la matière organique. On peut y parvenir en créant des conditions moins propices au développement de microbes dans le sol. Par exemple, la présence de résidus à la surface rafraîchit les sols, ce qui ralentit la décomposition. On obtient un résultat semblable si l'on garde aussi longtemps que possible des plantes en croissance, puisque celles-ci assèchent le sol tout en le rafraîchissant par leur ombrage.

On peut également ralentir la décomposition en séparant la matière organique des micro-organismes. Les sols sont habituellement granuleux et la matière organique se trouve protégée au sein des granules (ou agrégats). La destruction de ces agrégats par un labour intensif l'expose donc aux microbes. Par conséquent, les pratiques qui perturbent les sols le moins possible tendent à conserver les réserves de carbone du sol.

On peut aussi protéger les matières organiques en les plaçant là où les conditions ne se prêtent pas à la décomposition, par exemple en les maintenant à la surface où elles resteront plus sèches ou en les enfouissant assez profondément pour qu'elles se trouvent dans un milieu frais (bien que cette dernière approche exige un labour intensif).

Pratiques visant à accroître les réserves de carbone du sol

Pour accroître les quantités de carbone présentes dans le sol, on peut prendre de nombreuses mesures se traduisant par l'ajout de nouveau C ou par le ralentissement de la décomposition (ou les deux à la fois). Les méthodes que nous proposons ici donnent souvent de bons résultats bien que la quantité de C emmagasinée dépende du climat et du type de sol :

Réduction des labours : autrefois, les labours étaient nécessaires à la lutte contre les mauvaises herbes et à la préparation des sols pour les semis. Mais à l'heure actuelle, on dispose d'herbicides, et les nouveaux appareils de

Arbres en milieu agricole et réservoir de carbone

Depuis longtemps, les agriculteurs plantent des arbres en vue de constituer un brise-vent ou pour d'autres raisons environnementales. Comme le Protocole de Kyoto reconnaît explicitement que « l'afforestation », c'est-à-dire la plantation d'arbres sur des terres antérieurement non boisées, constitue une compensation légitime en fixation de carbone, nous devons savoir quelle quantité de C peut être stockée dans ces arbres et à quel rythme ce stockage peut s'effectuer.

Le Centre des brise-vent de l'Administration du rétablissement agricole des Prairies (ARAP) à Indian Head (Saskatchewan) a déterminé les quantités de C stockées et les taux de stockage du C dans les brise-vent des prairies. Les arbres utilisés à cette fin contiennent de 162 à 544 kg de C, et ce sont les peupliers qui en contiennent le plus. Les brise-vent constitués d'arbustes peuvent contenir jusqu'à 52 tonnes de C par kilomètre.



(J. Kort, AAC)

semis permettent de placer les graines directement dans le sol non labouré. Les labours intensifs ne sont donc plus nécessaires et de plus en plus d'agriculteurs ne labourent plus du tout, optant pour la culture sans labour ou le « semis direct ». Le C reste alors protégé à l'intérieur des agrégats, où il se décompose moins vite; les résidus sont laissés à la surface du sol, où la décomposition est plus lente, et ils rafraîchissent également le sol lui-même. La culture sans labour et les autres types de culture minimale empêchent aussi l'érosion, préservant ainsi la qualité des sols et les possibilités de photosynthèse pour l'avenir. Une grande partie des producteurs canadiens pourraient adopter la culture sans labour, qui occupait déjà 14 % des terres cultivées en 1996.

Ajout de nutriments : là où les sols sont trop pauvres en nutriments, l'épandage d'engrais, de fumier ou d'engrais verts accroît les rendements et se traduit donc par des apports de C plus importants. Les fumiers permettent aussi parfois d'améliorer l'état physique ou « l'état d'ameublissement » des sols, ce qui fait augmenter encore davantage les rendements et les apports de résidus.

Culture de plantes fourragères vivaces : les plantes vivaces piègent plus de CO_2 que les annuelles parce que leur croissance se poursuit sur une plus longue période de l'année. Il est possible qu'elles ralentissent aussi la décomposition parce qu'elles assèchent plus le sol et qu'elles n'exigent aucun labour. De nombreuses plantes vivaces comme les herbacées établissent un réseau de racines très étendu, plaçant ainsi de grandes quantités de carbone dans le sol.

Abandon des cultures sur certaines terres : la façon la plus efficace d'accroître la teneur en carbone du sol est probablement de permettre le retour de la végétation naturelle, qu'il s'agisse d'herbacées ou d'arbres. Comme il n'y a presque pas sinon aucun prélèvement de carbone par la récolte de produits, pratiquement tout le C piégé par photosynthèse retourne dans le sol ou est stocké sous forme de bois. Théoriquement, toutes ces terres « mises de côté » devraient finir par regagner tout le carbone perdu depuis la mise en culture; cependant cette option entraîne une baisse de productivité et n'est probablement envisageable que sur des terres marginales ou sur de petites superficies cultivées portant des brise-vent ou des voies d'eau engazonnées devant enrayer l'érosion causée par le vent et l'eau.

Élimination de la mise en jachère : la pratique qui consiste à laisser des terres sans culture pendant une saison (mise en jachère) permet de lutter contre les mauvaises herbes et d'accroître l'humidité du sol. Mais elle entraîne un appauvrissement des réserves de carbone parce que pendant l'année de mise en jachère le sol ne reçoit aucun nouvel apport de résidus et reste chaud et humide, ce qui accélère la décomposition. Une mise en culture continue (une récolte par année) produit un accroissement des réserves de C. Au cours des dernières années, l'étendue des surfaces en jachère a connu une décroissance mais elle représente encore quelque 6 millions d'hectares chaque année. Il est possible que l'abandon de la jachère soit difficile à envisager dans quelques endroits très secs comme certaines régions du sud des Prairies.

Cultures de couverture : là où la saison de croissance est assez longue, on peut semer une culture d'hiver après la récolte principale, ce qui peut avoir pour effet d'ajouter plus de résidus au sol et d'empêcher l'érosion.

Abandon du brûlage des résidus : lorsqu'on brûle des résidus, presque tout le carbone qu'ils contiennent s'échappe dans l'atmosphère sous forme de CO_2 au détriment des quantités ajoutées au sol.

Plantes et variétés à haut rendement : les plantes et les variétés dont la photosynthèse est plus efficace produisent souvent plus de résidus et permettent donc un apport plus important de carbone dans le sol. Cependant, la sélection des nouvelles variétés se fait en fonction de la valeur économique du produit (p. ex. grain), et le contenu en carbone des résidus et des racines n'augmente pas autant que celui du produit récolté.

Gestion de l'eau : l'eau est souvent le facteur qui limite la croissance végétale. Dans les régions sèches du sud des Prairies, on peut accroître les rendements par l'irrigation ou en captant et en entreposant l'eau de façon plus efficace (p. ex. à l'aide de résidus végétaux ou de brise-vent qui retiennent la neige). Dans les régions du centre et de l'est du Canada où il peut y avoir un excès d'eau dans certains sols, le drainage permet parfois de faire augmenter la croissance des plantes et les apports de carbone.

Restauration des terres humides : certaines terres basses ont été asséchées pour faire place à l'agriculture. En les inondant de nouveau, on couperait l'apport en oxygène, ce qui empêcherait la décomposition. Le rétablissement de ces terres humides ou marais permettrait un gain rapide de C, bien que la faible superficie des terres en cause limite la quantité totale de CO_2 pouvant être fixée par ce moyen.

Intégration du bétail dans les systèmes de culture : l'utilisation de cultures comme fourrage permet un recyclage efficace du carbone si la gestion des fumiers est appropriée. Bien que des quantités importantes de C puissent être prélevées sous forme de fourrage ou de produits d'ensilage, une bonne partie de ce volume peut retourner au champ dans le fumier. Celui-ci stimule la croissance des végétaux et la photosynthèse, ce qui entraîne d'autres apports de carbone dans le sol.

Gestion des pâturages : le type de pâturage pratiqué sur une prairie peut se répercuter de plusieurs façons sur le cycle de C. Il influence la proportion de la plante qui est « récoltée » par l'animal, la répartition du carbone dans le fumier, l'état du sol (sous l'action des sabots) et l'importance relative de chacune des espèces végétales. Étant donné le grand nombre d'effets dont il faut tenir compte, la relation entre le carbone du sol et le type de pâturage est encore mal connue. Cependant, le pâturage excessif peut entraîner d'importantes pertes par érosion. Il est probable qu'on peut accroître les réserves de C de ces sols en réduisant le nombre de têtes par hectare.

De nombreuses études effectuées dans tout le Canada ont permis de montrer que ces pratiques permettaient de faire

augmenter les quantités de carbone présentes dans le sol. Cependant, les gains possibles sont mal quantifiés et sont déterminés par la teneur en carbone initiale, les propriétés du sol, le climat et d'autres facteurs. L'importance des gains varie également selon la mise en œuvre plus ou moins complète de ces pratiques par les exploitants, un élément qui dépend à son tour des prix des produits, des coûts de production et d'autres paramètres qui fluctuent d'une année à l'autre.

Malgré ces incertitudes, certaines évaluations permettent de penser que les sols agricoles canadiens pourraient s'enrichir de plusieurs millions de tonnes de carbone par année si les pratiques à cet effet étaient généralisées, et de tels gains se traduiraient par une diminution nette du CO_2 atmosphérique. À plus ou moins long terme, cependant, les gains annuels s'amenuiseraient parce que l'accroissement des réserves de carbone rendrait de plus en plus difficile l'ajout de quantités supplémentaires.

Stockage du carbone dans le carton paille

Le carton paille fait à partir de résidus de plantes cultivées peut servir de réservoir de C et aider à limiter les émissions de gaz à effet de serre. À la fin de leur vie utile, les panneaux pourraient être brûlés dans des centrales thermiques à la place du combustible fossile, ce qui entraînerait une réduction véritable des émissions de CO_2.

L'usine industrielle de l'Isobord à Elie (Manitoba), en est un exemple. On compte y utiliser 180 000 tonnes de paille de blé par année, ce qui revient à l'équivalent de 267 000 tonnes de CO_2 par an. L'usine à Elie a déjà vendu 80 % de sa production des cinq premières années.



Stockage de carbone dans la matière végétale

Bien que dans les écosystèmes agricoles le sol constitue la principale réserve de carbone, d'autres quantités peuvent être entreposées dans la matière végétale. Sur les terres agricoles, on peut accumuler du carbone végétal en faisant pousser des arbres soit dans des brise-vent (qui permettent également de lutter contre l'érosion), soit dans des boisés attenants aux bâtiments d'exploitation. Le bénéfice net de cette pratique du point de vue du CO_2 atmosphérique dépend de la superficie plantée en arbres, de la vitesse de croissance de ces derniers et du devenir du bois. Si celui-ci est brûlé, par exemple, le bénéfice à long terme est limité à moins que cela permette d'éviter la consommation d'autres combustibles.

Une autre forme de stockage du carbone végétal est la conversion des résidus végétaux en produits à longue durée de vie. La fabrication de panneaux de fibres (ressemblant à du bois) à partir de paille de céréales offre une possibilité. Ces matériaux sont utilisés en construction et le carbone reste ainsi stocké pendant une longue période alors que sa décomposition produirait du CO_2 si la paille était enfouie dans le sol.

Réduction de la consommation de combustibles fossiles

Dans les fermes, on se sert des combustibles fossiles pour faire fonctionner les machines, chauffer les bâtiments, sécher les récoltes et transporter les marchandises. L'approvisionnement en matériaux servant à l'exploitation agricole (engrais, pesticides, machines et bâtiments) nécessite également une certaine quantité d'énergie. Dans les inventaires nationaux de production de gaz à effet de serre, la plus grande partie de ces émissions n'est pas affectée à l'agriculture. Cependant, si les exploitations agricoles réduisaient leur

consommation de combustibles sous cette forme, cela permettrait malgré tout de faire diminuer la production totale de CO_2 au pays.

On peut abaisser la consommation de combustibles fossiles à la ferme même et par l'intermédiaire des intrants de l'activité agricole en adoptant par exemple les pratiques suivantes :

Réduction des labours : le labour exige énormément d'énergie pour soulever et retourner le sol. La réduction ou l'abandon de cette pratique permet donc d'économiser les combustibles fossiles. Une étude effectuée en Ontario a montré que la consommation de carburant diesel était passée de 30 litres par hectare avec le labour traditionnel à 4 litres par hectare dans un système modifié sans labour. Dans les Prairies, une autre étude portant sur les utilisations directes et indirectes des combustibles a établi que la réduction des labours se traduisait par une diminution de 40 % des émissions engendrées par la consommation directe de combustible (fig. 15). Avec la culture minimale, les quantités résultant de l'utilisation des pesticides augmentaient légèrement et celles reliées aux engrais restaient inchangées. Si l'on compte à la fois les émissions directes et indirectes, les quantités produites par la culture sans labour se chiffraient à 92 % des émissions attribuables au labour conventionnel, celles provenant de la culture minimale étant intermédiaires.

Utilisation plus efficace des engrais : la fabrication et le transport des engrais consomment énormément d'énergie; pour chaque kilogramme d'azote utilisé dans les engrais, environ un kilogramme de carbone est libéré dans l'atmosphère sous forme de CO_2. Il est donc possible de réduire les émissions de dioxyde de carbone en optant pour les méthodes d'épandage qui produisent des rendements élevés avec des quantités d'engrais moindres. Pour ce faire, on peut placer l'engrais de façon plus efficace (p. ex. en bandes), n'utiliser que les quantités nécessaires selon les résultats des tests effectués sur le sol et, dans un champ donné, moduler les quantités en fonction des fluctuations de la qualité du sol (« agriculture de précision »).

Tableau 15 Effet de la plantation d'une légumineuse sur les émissions de C dans un système cultural de la Saskatchewan

Rotation (avec ou sans légumineuses)	Émissions de CO_2 (kg C/ha/an)
Pois–orge–blé	82
Orge–orge–blé	114

(E. Coxworth, Saskatoon, (Saskatchewan))

Culture de légumineuses : les légumineuses comblent souvent une bonne partie de leurs besoins en azote en puisant celui-ci dans l'air. Lorsqu'elles meurent et se décomposent, cet azote se trouve libéré dans le sol. Une utilisation minutieuse des légumineuses dans les systèmes de culture permet donc de réduire la consommation d'engrais azotés et, donc, les émissions de CO_2. Dans une étude effectuée à Melfort, en Saskatchewan, l'insertion de pois dans la rotation des cultures a entraîné une diminution de 28 % des émissions attribuables à la consommation de combustibles fossiles (tableau 15).

Utilisation plus efficace des fumiers : le fumier animal est riche en nutriments, mais l'utilisation de ceux-ci n'est pas toujours efficace en partie parce que les fumiers sont lourds et volumineux et que leur transport est coûteux. En évitant un épandage excessif sur des surfaces restreintes, d'une part on éviterait que ces nutriments s'échappent dans l'environnement où ils ont des effets néfastes, et d'autre part on économiserait les engrais, ce qui réduirait d'autant les émissions de CO_2.

Amélioration de l'efficacité de la consommation d'énergie : pour économiser l'énergie, on peut également faire sécher les récoltes dans le champ lorsque c'est possible, construire des systèmes

Utilisation de l'éthanol comme carburant

En 1997, les Canadiens ont utilisé environ 40 millions de litres d'éthanol et 34 milliards de litres d'essence; l'éthanol représente donc environ 0,1 % des ventes totales d'essence au Canada. L'éthanol possède un contenu énergétique plus faible que l'essence. Toutefois, en mélange avec de l'essence dans une proportion inférieure à 10 %, il n'affecte pas la consommation des véhicules.

L'éthanol est un alcool liquide produit par fermentation de matières glucidiques (maïs, blé, orge) ou cellulosiques (résidus agricoles, bois, déchets de bois). La plus grande partie du CO_2 émis lors de la conversion de biomasse en éthanol et de son utilisation comme carburant est fixée de nouveau lors de la croissance de matières végétales, ce qui limite l'effet de serre de ce gaz. Les émissions nettes de CO_2 pendant le cycle de vie sont réduites d'environ 3 % si on brûle une essence à 10 % d'éthanol au lieu d'une essence ordinaire sans plomb. Les développements récents dans l'industrie de l'éthanol permettront, estime-t-on, d'accroître la production canadienne d'éthanol à partir de blé et de maïs jusqu'à environ 350 millions de litres d'ici l'an 2000.



(M. Stumborg, AAC)

d'irrigation plus efficaces et isoler les bâtiments de ferme. En outre, une bonne partie des mesures d'économie d'énergie préconisées pour les constructions urbaines s'appliquent également aux exploitations agricoles.

Une méthode radicalement différente de réduction des émissions en provenance des carburants fossiles consiste à produire des récoltes qui constituent une source d'énergie de rechange. L'utilisation de ce biocombustible peut remplacer la consommation de carburants fossiles et faire ainsi diminuer les émissions de CO_2. Au lieu de l'extraction de C fossile et de sa transformation en CO_2 par combustion, la production de biocombustible représente donc un recyclage du carbone qui a auparavant été prélevé dans l'atmosphère par photosynthèse.

Le mode d'utilisation le plus efficace des combustibles végétaux est le brûlage direct. Bien que cette approche soit en usage dans certaines régions du monde, elle n'est pas toujours pratique au Canada où il faut parfois transporter les combustibles sur de grandes distances.

Une autre solution consiste à faire fermenter les produits végétaux pour produire de l'éthanol que l'on mélange avec de l'essence dans une proportion de 10 %. Ce mélange peut servir à alimenter la plupart des moteurs à essence et donc à réduire les émissions de CO_2 provenant des combustibles fossiles. Cependant l'économie nette de combustible fossile dépend de la quantité de carburant utilisée en premier lieu pour produire ce type de récolte.

Les plantes qui se transforment le plus facilement en éthanol sont celles qui ont une forte teneur en amidon, les céréales comme le maïs et le blé constituant des matériaux de choix. Selon une étude, si l'on tient compte des quantités de CO_2 émises pour produire la culture, l'utilisation d'éthanol de maïs se traduit par une diminution d'environ 40 % du CO_2 qui serait libéré par l'essence ainsi remplacée. Si l'on compte les autres gaz à effet de serre, le choix de l'éthanol de maïs ou de blé réduit l'effet de réchauffement du globe de 25 à 30 %. Au Canada, on produit actuellement environ 30 millions de litres d'éthanol à partir de maïs et de blé annuellement, ce qui représente une diminution des émissions de CO_2 d'environ 33 Gg (milliers de tonnes) par an. Si la production canadienne d'éthanol atteint le volume de 265 millions de litres prévu pour la fin de 1999, les quantités nettes de CO_2 libérées dans l'atmosphère diminueront proportionnellement.

Bien qu'il soit plus facile de fabriquer de l'éthanol à partir de matériaux riches en amidon, il existe maintenant de nouvelles méthodes qui permettent d'exploiter à cette fin des matières fibreuses telles que les résidus de cultures, les plantes fourragères et les déchets végétaux. Chaque année, il y a un excès de paille qui pourrait atteindre 2 Tg (millions de tonnes) après couverture des besoins représentés par les litières animales et la lutte contre l'érosion. Ce volume permettrait de produire environ 500 millions de litres d'éthanol et de remplacer ainsi 0,5 Tg (millions de tonnes) de CO_2 générés par les combustibles fossiles (soit 2 % des émissions provenant de l'utilisation de combustibles en agriculture). Ce procédé rendrait également possible la fabrication d'éthanol à partir d'herbacées vivaces cultivées sur des terres marginales.

On peut aussi réduire la consommation de combustibles fossiles en produisant du carburant pour les moteurs diesel (« biodiesel ») à partir d'oléagineux comme le canola, le lin, le soja et le tournesol. Bien qu'elle soit techniquement possible, la fabrication de biodiesel est encore beaucoup plus coûteuse que l'extraction du combustible fossile.

État actuel des méthodes visant à réduire les émissions de dioxyde de carbone

Le cycle du carbone joue un rôle crucial dans les systèmes agricoles. Les méthodes visant à réduire les émissions de CO_2 se fondent principalement sur une gestion plus efficace de ce cycle : recyclage de la plus grande quantité possible de carbone organique, perturbation minimale du sol, utilisation optimale de l'énergie du soleil (par l'intermédiaire de la photosynthèse) et moindre recours aux sources d'énergie extérieures.

Comme elles vont dans le sens d'une meilleure efficacité, beaucoup de ces méthodes contribuent à la protection des ressources agricoles et peuvent même être rentables. On les adopte donc aussi pour d'autres raisons que leurs effets bénéfiques sur le CO_2 atmosphérique. Dans la majorité des fermes canadiennes, par exemple, on laboure moins qu'il y a une génération, et la culture sans labour est de plus en plus répandue. De la même façon, la superficie couverte par les jachères est passée d'environ 11 millions d'hectares en 1971 à quelque 6 millions d'hectares en 1996. Il est probable que ces pratiques se généraliseront au cours des prochaines décennies ainsi que d'autres méthodes de gestion du carbone.

Les deux principales stratégies (stockage de plus grandes quantités de carbone et consommation moindre de carburants fossiles) se traduisent par une réduction des émissions de CO_2 sur des échelles de temps différentes. Le stockage de C dans les sols amène des gains relativement à court terme, c'est-à-dire pendant les premières années ou décennies, mais le prélèvement net de dioxyde de carbone s'amenuise au cours du temps parce qu'il devient de plus en plus difficile d'emmagasiner encore plus de carbone dans les sols où il s'est déjà accumulé. D'autre part la réduction des émissions de CO_2 attribuables à la consommation de combustibles fossiles peut paraître plutôt modeste à court terme, mais elle peut devenir significative sur une période de plusieurs décennies. La quantité de CO_2 atmosphérique qui peut être emmagasinée dans le sol sous forme de carbone est limitée, alors que les économies de combustibles fossiles peuvent se poursuivre indéfiniment.

Réduction des émissions de méthane

Tout comme le CO_2, le méthane fait partie du cycle du carbone dans les écosystèmes agricoles. Il est produit par la décomposition lorsque le manque d'oxygène empêche la transformation

Effet des additifs alimentaires sur les émissions de méthane par les vaches laitières

Les chercheurs d'AAC ont mesuré les quantités de CH_4 émises par des vaches laitières dans une étable, pendant une période de 3 ans, à l'aide d'un système d'échantillonnage automatique des gaz. Lors d'une expérience, de 95 à 100 vaches ont été nourries avec une ration totale mélangée constituée de fourrage concentré et de fourrage ensilé (dans un rapport 35/65 à l'état sec) et ont produit en moyenne 26,8 kg de lait par vache par jour. Après une période témoin, on a ajouté du monensin à la ration, ce qui a entraîné une diminution immédiate des émissions de CH_4. En même temps, la production de lait a augmenté et la consommation journalière a diminué, indiquant une utilisation plus efficace de la nourriture. Les effets du monensin ont persisté pendant deux mois après l'arrêt du traitement. Toutefois, lors d'une deuxième expérience réalisée cinq mois plus tard, les bactéries du rumen semblaient devenir résistantes au monensin. Les organismes de réglementation étudient actuellement l'utilisation du monensin dans l'alimentation des vaches laitières, mais ils ne l'ont pas encore approuvée. Cet additif alimentaire est utilisé dans l'alimentation des bovins de boucherie depuis 1975. Ces résultats montrent que les additifs alimentaires peuvent réduire de façon importante les émissions de CH_4 par les vaches laitières. Toutefois, il y a lieu d'effectuer d'autres travaux pour résoudre le problème de la résistance microbienne du rumen et pour mettre au point un système de rotation des additifs alimentaires qui permette de contourner ce problème.



(H. Jackson et F. Sauer, AAC)

complète du carbone des matières organiques en dioxyde de carbone. Bien que le CO_2 et le CH_4 soient deux gaz à effet de serre, ce dernier produit un réchauffement beaucoup plus prononcé, et il est donc préférable que le C soit libéré sous forme de CO_2.

La plus grande partie du CH_4 libéré par l'agriculture canadienne est produit par l'élevage, que ce soit directement par les animaux ou par leur fumier. Un certain nombre de méthodes ont été proposées pour réduire les émissions provenant de ces sources, et quelques-unes sont déjà en usage.

Réduction du méthane émis par les animaux

Une grande partie du CH_4 provenant des exploitations agricoles est produite par les ruminants (animaux d'élevage comme les bovins et les moutons, dont le système digestif comporte un rumen). Les méthodes suivantes permettent de réduire les quantités de méthane émises par ces animaux :

Modification de l'alimentation pour accélérer la digestion : la plus grande partie du CH_4 provient du rumen, où le fourrage subit une fermentation en l'absence d'oxygène. Plus les aliments restent longtemps à cet endroit, plus importante est la quantité de carbone transformé en CH_4. Toute pratique ayant pour effet d'abréger le séjour du fourrage dans le rumen réduira donc la production de méthane. Dans une étude menée sur des bouvillons, lorsqu'on raccourcissait de 63 % le temps de séjour du fourrage dans le rumen, les émissions de CH_4 diminuaient de 29 %. Les méthodes suivantes permettent d'accélérer le passage des aliments dans le rumen :

- utilisation de céréales fourragères, de légumineuses et de produits d'ensilage faciles à digérer
- récolte des plantes fourragères à un stade précoce, lorsqu'elles sont à l'état succulent
- broyage des aliments pour accroître la surface de contact
- utilisation minimale de foins et d'herbacées riches en fibres
- au besoin, ajout de suppléments concentrés.

Ajout d'huiles comestibles : l'ajout d'huiles de canola, de noix de coco ou autres dans l'alimentation peut faire diminuer la production de CH_4 en inhibant l'activité des bactéries méthanogènes. Bien qu'elle soit assez efficace, cette pratique n'est pas toujours économique.

Ionophores : les ionophores sont des additifs alimentaires qui sont déjà largement utilisés par les producteurs de bovins de boucherie et qui inhibent la production de CH_4 par les bactéries du rumen. Cependant, certains indices permettent de penser que ces micro-organismes peuvent s'adapter à un ionophore donné, ce qui en réduit l'effet à terme. Pour maintenir une efficacité durable, il peut être nécessaire d'alterner entre plusieurs ionophores.

Modification des bactéries présentes dans le rumen : à l'avenir, on devrait pouvoir introduire dans le rumen des bactéries modifiées génétiquement qui produiront moins de CH_4. Bien que les recherches aient donné des résultats prometteurs, ce type d'inoculant n'est pas encore disponible dans le commerce.

Amélioration du rendement : toute pratique qui accroît le rendement par tête permet de réduire les émissions de CH_4, parce qu'il faut un cheptel moins important pour obtenir la même quantité de produit. Par exemple, en augmentant la quantité de fourrage par animal, on peut faire augmenter le volume de CH_4 émis par tête mais abaisser la quantité libérée par litre de lait ou par kilogramme de viande de bovin. Toute autre pratique qui améliore le rendement permet probablement de réduire les volumes de méthane émis par unité de produit.

Bon nombre de ces pratiques sont déjà applicables et économiques. Lorsque ces méthodes sont utilisées conjointement, les pertes d'énergie par production de CH_4 peuvent être ramenées à 2 ou 3 % de l'énergie brute du fourrage alors qu'elles se situent habituellement autour de 5 à 8 %. Ces pratiques offrent souvent des avantages économiques parce qu'elles accroissent le rendement

Systèmes de gestion des bovins

Les producteurs nourrissent et gèrent leurs bovins de différentes façons au cours des différentes étapes du cycle de production. La quantité de gaz à effet de serre émise dépend du système utilisé et de l'étape du cycle. On peut comparer les systèmes de gestion en termes des émissions nettes : par exemple, en grammes de CH_4 émis par kilogramme de lait ou de viande produit. On réduit les émissions de CH_4 en nourrissant les bovins avec des céréales au lieu de fourrage. Le type de nourriture ne constitue qu'un des facteurs à considérer lors de la sélection d'un système de gestion. Par exemple, l'utilisation de fourrages dans un système d'alimentation encourage la plantation d'espèces fourragères vivaces. Ce type de plantation est avantageux comparativement aux espèces annuelles, qui entraînent une plus grande perte de C par les sols. La gestion du fumier et la production de gaz à effet de serre qui s'ensuit doit aussi être pris en considération lorsqu'on veut optimiser le système de gestion.





(P. Strankman, Canadian Cattlemen's Association et K. Wittenberg, Université du Manitoba)

du fourrage; elles sont déjà utilisées dans un très grand nombre d'exploitations, en particulier dans les élevages de vaches laitières et de bovins de boucherie.

Réduction des émissions de méthane provenant des fumiers

La plus grande partie du CH_4 provenant des fumiers est produite pendant l'entreposage. Lorsque le fumier est stocké sous forme liquide ou en tas mal aérés, le manque d'oxygène empêche la décomposition complète en CO_2, ce qui provoque l'émission de CH_4. Par conséquent, la plupart des mesures de réduction des émissions consistent à ralentir la décomposition, à améliorer l'aération ou à raccourcir l'entreposage. On retiendra les méthodes suivantes :

Manutention des fumiers sous forme solide plutôt que liquide : l'oxygénation se fait habituellement mieux dans le fumier solide, ce qui favorise la production de CO_2 au lieu de CH_4.

Épandage sur le sol aussitôt que possible : plus le fumier est laissé longtemps dans les parcs d'engraissement, en tas ou dans des cuves ou fosses à lisier, plus il dégage de CH_4. On peut donc réduire les émissions en procédant à des épandages fréquents. Malheureusement, le stockage du fumier est parfois inévitable lorsque la terre est gelée, trop humide ou en culture.

Réduction de la quantité de litière présente dans les fumiers : le fumier qui contient moins de litière, comme de la paille, renferme moins de C qui peut être converti en CH_4.

Maintien des cuves de stockage à une température fraîche : le maintien des fumiers à une température fraîche par l'emploi de cuves isolées ou creusées ralentit leur décomposition et donc l'émission de CH_4.

Combustion du méthane : le méthane est un combustible très efficace; en effet, il

L'entreposage amélioré du fumier peut réduire les émissions de gaz à effet de serre

Traditionnellement, le fumier est entreposé au cours de l'été et de l'hiver et est épandu au début de l'automne ou du printemps. L'été est, en général, la saison où la production de gaz est la plus élevée, parce que les températures plus hautes augmentent l'activité microbienne dans le fumier entreposé. L'entreposage anaérobie favorise la production de CH_4, tandis que l'entreposage aérobie produit du CO_2 et du N_2O.

Les chercheurs ont mesuré les émissions de gaz à effet de serre par du fumier de bovins de boucherie et du fumier de vaches laitières, entreposés de trois façons : sous forme liquide, en compost ou en tas. Les émissions de méthane et de N_2O, exprimées en équivalents de CO_2, étaient toujours inférieures lorsque le fumier était entreposé sous forme de compost comparativement aux autres méthodes d'entreposage. Le fumier liquide des vaches laitières émettait 1,9 fois plus de gaz à effet de serre que le compost. Le fumier en tas émettait 1,5 fois plus de gaz à effet de serre que le compost. Le méthane était le principal gaz émis dans le cas de la boue et du fumier en tas. L'oxyde nitreux constituait la plus grande partie des émissions du compost et une part importante des émissions du fumier en tas.

Les quantités de CH_4 et de N_2O émises par le fumier de bovins de boucherie étaient de beaucoup inférieures à celles provenant du fumier de vaches laitières. Les quantités de CH_4 et de N_2O émises par le fumier de bovins de boucherie en tas et sous forme de boue étaient 1,3 fois et 4 à 6 fois respectivement plus importantes que celles émises par le compost.

Ces résultats indiquent que l'entreposage aérobie, comme le compostage, peut limiter les émissions de gaz à effet de serre. D'autre part, l'obtention de conditions complètement anaérobies lors de l'entreposage favorise l'émission de CH_4 qui pourrait être récupéré et utilisé comme combustible.



Bassins dans lesquels le fumier était entreposé sous forme de boue, en tas ou composté. Une grande enceinte installée au-dessus de chaque bassin permettait de contrôler les émissions de gaz pendant un temps donné.

(E. Pattey, AAC)

est le principal constituant du gaz naturel. Dans certains pays, on recueille et on brûle déjà le méthane qui provient des réserves de fumier. Au Canada, cette méthode peut ne pas être encore rentable ni applicable à grande échelle, mais elle suscite un intérêt croissant. La combustion du CH_4 le transforme en CO_2, qui a un potentiel de réchauffement beaucoup moins important.

Abandon de l'enfouissement du fumier : au Canada, bien que la plus grande partie du fumier soit utilisée pour enrichir les sols, de petites quantités sont encore enfouies. Comme dans ce cas la décomposition se fait généralement en l'absence d'oxygène, cette pratique peut engendrer la production de grandes quantités de CH_4. (En outre, elle représente un gaspillage des nutriments précieux contenus dans le fumier.)

Aération du fumier pendant le compostage : le fumier est parfois composté avant l'épandage, ce qui le rend plus facile à transporter. On peut réduire les quantités de CH_4 qui sont libérées au cours du compostage en aérant le tas de fumier, c'est-à-dire en le retournant régulièrement ou en ventilant l'intérieur de celui-ci. L'aération permet une décomposition complète en CO_2 au lieu de la production de CH_4.

Ces méthodes permettent dans une certaine mesure de faire diminuer les quantités de CH_4 émises par le fumier animal. Étant donné les fortes densités de bétail dans certaines régions et les coûts de manutention et de transport, la gestion des fumiers reste difficile. Il est possible qu'on doive trouver d'autres méthodes de réduction des émissions.

Biotechnologie du traitement du fumier

Les chercheurs ont mis au point un système de traitement du lisier de porc basé sur la digestion anaérobie à température ambiante dans un bioréacteur à opération séquentielle (DAOS). Les essais réalisés en laboratoire ont montré que la biotechnologie DAOS est très stable et polyvalente et qu'elle fonctionne bien à basse température (entre 10 et 20 °C). De plus, les bioréacteurs ne doivent être chargés qu'une fois par semaine, lors de la récupération habituel du fumier.

Comme on utilise des réservoirs étanches pour maintenir les conditions anaérobies dans le bioréacteur, il n'y a aucune émission de gaz à effet de serre au cours du traitement et de l'entreposage. Le biogaz obtenu peut être récupéré et utilisé sur place comme source d'énergie.

Cette biotechnologie a aussi d'autres avantages. Elle désodorise et stabilise le lisier de porc, entraînant la dégradation de la plupart des 150 matières odorantes qui s'y trouvent. De plus, cette technologie augmente les quantités d'azote et de phosphore disponibles pour les cultures et diminue la quantité d'engrais chimiques nécessaire.



Bioréacteur anaérobie discontinu en séquence.

(D. Massé et F. Croteau, AAC)

Réduction des émissions d'oxyde nitreux

Une partie du N_2O produit par les terres agricoles se forme lorsque le NO_3^- excédentaire du sol subit une dénitrification, que ce soit sur les terres agricoles mêmes ou après lessivage. Les agriculteurs peuvent réduire ces émissions en empêchant l'accumulation de NO_3^- ou en évitant de créer dans les sols des conditions propices à la dénitrification. Une partie du N_2O est également libérée lorsque le NH_4^+ est converti en NO_3^- (nitrification). On peut réduire les émissions provenant de cette source en ajoutant des quantités moindres de NH_4^+ ou en ralentissant la nitrification. La meilleure façon de réduire les pertes de N_2O consiste à gérer le cycle de N de façon plus efficace

pour éviter l'accumulation d'excès de NH_4^+ ou de NO_3^-.

Les méthodes de réduction des émissions de N_2O varient selon les systèmes de culture employés au Canada, mais on retiendra les exemples suivants :

Épandages d'engrais selon les besoins des plantes : la meilleure forme de réduction des émissions de N_2O pourrait être d'ajouter au sol juste assez de N pour que les cultures puissent atteindre un rendement optimal sans laisser de surplus d'azote assimilable. Il est rare qu'on puisse trouver une combinaison parfaite, mais il est souvent possible d'améliorer le synchronisme si l'on calcule les épandages après avoir effectué des tests sur les sols et évalué les émissions de N provenant des résidus et de la matière organique. Dans les champs où les besoins en engrais varient, on pourra adapter encore mieux les quantités d'engrais aux besoins des cultures en procédant à l'épandage de quantités de N différentes selon les endroits (« agriculture de précision »).

Élimination des épandages excessifs : les terres auxquelles on a ajouté beaucoup de fumier peuvent émettre beaucoup de N_2O parce qu'elles ont reçu un apport important d'azote et de carbone assimilable, deux facteurs qui favorisent la dénitrification. En outre, les épandages peuvent être excessifs parce qu'ils sont souvent vus comme un moyen de se débarrasser du fumier. Il est possible de réduire en grande partie les émissions de N_2O provenant de cette source en adaptant les épandages aux besoins des plantes.

Optimisation du moment de l'épandage : le moment de l'épandage de produits azotés revêt autant d'importance que les quantités épandues. Idéalement, les agriculteurs devraient ajouter de l'azote juste avant le moment où l'assimilation par les plantes atteint son maximum. Dans la mesure du possible, ils devraient éviter les épandages d'engrais ou de fumier en automne. Ils devraient également calculer le moment de l'enfouissement des cultures riches en azote comme les légumineuses pour que la libération de N par les résidus coïncide avec l'assimilation par les cultures.

Aération du sol : la mauvaise oxygénation qui prévaut habituellement dans les sols saturés favorise la dénitrification et donc la production de N_2O. Les agriculteurs peuvent donc réduire les émissions de N_2O par une meilleure gestion de l'eau (en drainant les sols sujets à la saturation, en évitant une irrigation excessive et en améliorant la structure du sol par des labours).

Amélioration des formes d'engrais : des recherches indiquent que certaines formes d'engrais libèrent plus de N_2O que d'autres. Les dégagements les plus intenses proviendraient de l'ammoniac anhydre et les plus faibles des formes contenant du NO_3^-. Cette conclusion permet donc de penser que les producteurs agricoles peuvent réduire leurs émissions de N_2O par le choix de leurs engrais. Cependant ces différences entre les diverses formes d'engrais n'ont fait l'objet d'aucune vérification à grande échelle dans l'ensemble du Canada. Une autre option est l'utilisation d'engrais à libération lente tels que l'urée enrobée de soufre, qui libèrent l'azote graduellement et alimentent les cultures tout en empêchant l'accumulation d'azote assimilable. Bien que les formes à libération lente permettent une réduction efficace des émissions de N_2O, elles pourraient n'être économiques que pour les cultures de grande valeur.

Mise en place de l'engrais : la mise en place de l'engrais au voisinage immédiat des racines des plantes cultivées se traduit parfois par une meilleure utilisation des nutriments, ce qui permet un accroissement des rendements à partir de quantités moindres. D'autre part, l'enfouissement de l'engrais à trop grande profondeur dans le sol et l'épandage en bandes de formes d'engrais telles que l'urée peuvent amener une augmentation des émissions de N_2O.

Utilisation d'inhibiteurs de nitrification : certaines substances chimiques,

lorsqu'elles sont épandues en même temps que les engrais ou les fumiers, inhibent la formation de NO_3^- à partir du NH_4^+. Elles empêchent peut-être la production de N_2O de plusieurs façons : production de quantités moindres de N_2O pendant la nitrification, ralentissement de la dénitrification du NO_3^- déjà accumulé et, comme le NH_4^+ n'est pas sujet au lessivage, réduction des pertes de N dans l'eau souterraine où la dénitrification pourrait avoir lieu.

Cultures de couverture : après la récolte, là où la saison de croissance est assez longue, les agriculteurs peuvent semer des plantes qui absorbent l'excès de NO_3^- du sol, l'empêchant ainsi de s'échapper par lessivage ou de se transformer en N_2O.

Chaulage des sols acides : l'acidité favorise les émissions de N_2O; on peut donc éliminer celles-ci en procédant à l'épandage de chaux sur les sols acides.

Réduction des labours : bien que les résultats ne concordent pas tous, certaines études menées au Canada indiquent que les émissions de N_2O pourraient être moins importantes dans les terres non labourées que là où on effectue des labours de façon conventionnelle. S'ils sont confirmés, ces résultats permettront peut-être de démontrer que la culture sans labour peut s'accompagner d'une réduction des émissions au moins sur certains sols.

Ces stratégies peuvent contribuer à limiter la production de N_2O dans de nombreux cas. Cependant, étant donné que les flux de ce gaz sont si sporadiques, il est encore impossible de recommander toutes ces pratiques avec certitude pour l'ensemble des sols et des systèmes de culture existant au Canada. Mais les mesures qui permettent une meilleure utilisation de l'azote se justifient souvent déjà pour des raisons totalement étrangères aux émissions de N_2O. Les engrais représentent environ 9 % des coûts de production des exploitations agricoles, et toutes les pratiques qui limitent les pertes de N présentent également des avantages économiques.

Sommaire

Pour des raisons de simplicité, on traite souvent des méthodes de réduction des émissions de chacun des gaz séparément. Cependant, les cycles de C et de N sont intimement liés; l'arrivée d'une pratique agricole qui amène une réduction de l'un a presque toujours une influence sur l'autre. Les répercussions globales d'une pratique donnée sur l'effet de serre dépendent de son résultat net sur les émissions de tous les gaz et du potentiel de réchauffement de chacun de ceux-ci. Les exemples ci-dessous illustrent quelques-unes de ces interactions complexes.

L'une des stratégies de réduction des émissions de CO_2 passe par l'intensification des pratiques agricoles : élimination de la jachère, culture de variétés à haut rendement et recherche d'une meilleure productivité. Ces pratiques mènent à la production d'une plus grande quantité de résidus qui se transforment en matière organique, d'où une accumulation plus importante de carbone dans le sol. Cependant, il se peut que dans ce système plus intensif, l'amélioration de la productivité exige plus d'intrants, dont des engrais, ce qui peut entraîner une augmentation des émissions de N_2O. Pour calculer l'effet global de cette nouvelle pratique, on doit donc prendre en compte l'évolution des réserves de C du sol, le coût en CO_2 des intrants supplémentaires et tout accroissement éventuel de la production de N_2O. Comme celui-ci est un puissant gaz à effet de serre, une petite augmentation de ces émissions (1 kg de N par hectare par an) annulera un taux d'accumulation de C dans le sol relativement élevé (environ 130 kg de C par hectare par an).

L'évaluation devient encore plus complexe si l'on tient compte des animaux. Supposons par exemple qu'on choisisse d'affecter une plus grande superficie à la production de fourrages. Cela représenterait un gain important de carbone dans le sol, et comme l'épandage du fumier constitue un recyclage efficace

des nutriments, les besoins en engrais seraient réduits d'autant (ainsi que les émissions de N_2O provenant de ces mêmes engrais). Par contre, une bonne partie du carbone de ce système se retrouverait dans le fourrage des animaux, et une certaine proportion serait libérée sous forme de CH_4. De plus, le fumier produirait du CH_4 et du N_2O. Un seul changement du mode de gestion se répercuterait donc sur les émissions des trois gaz, parfois de façon négative et positive simultanément. Pour connaître l'effet net de ce choix de gestion, il faut également considérer le potentiel de réchauffement relatif de chacun de ces trois gaz.

Il ne nous est pas encore possible de comprendre toutes les interactions existant entre ces gaz, et les modèles dont nous disposons ne sont pas assez perfectionnés pour les prévoir. Pour le moment, on se contentera de reconnaître qu'ils forment un réseau complexe et que toute tentative visant à réduire les émissions de l'un d'entre eux peut se répercuter sur les autres. Cependant, l'effet net est souvent très positif; par exemple il se peut qu'un système d'élevage de bétail permette une accumulation de réserves de carbone dans le sol qui compense largement tout accroissement des émissions de CH_4. Il arrive même que tous les effets se renforcent mutuellement; la culture sans labour, par exemple, peut faire augmenter les réserves de C du sol, réduire les quantités de CO_2 produites par la consommation des combustibles fossiles et même amener une diminution des émissions de N_2O. De même, il est presque certain qu'une utilisation plus efficace des fumiers peut se traduire par une réduction à la fois des émissions de N_2O et de CH_4 et des coûts en CO_2 découlant de la fabrication des engrais.

Enfin, il convient de retenir que les diverses méthodes de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre ont des effets sur des échelles de temps différentes. Par exemple, les efforts visant à accroître les réserves de carbone du sol peuvent donner leurs meilleurs résultats dans un délai relativement court, soit une ou plusieurs décennies; mais les taux d'accumulation risquent ensuite de diminuer parce qu'il devient de plus en plus difficile d'ajouter du carbone aux réserves déjà constituées. En comparaison, les mesures de réduction des émissions de CH_4 provenant des ruminants, de N_2O des sols et de CO_2 des combustibles fossiles peuvent produire des résultats modestes à court terme, mais elles ont un effet plus considérable après plusieurs décennies parce qu'elles peuvent se poursuivre indéfiniment.

Autres effets des pratiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre

On ne peut pas juger de l'intérêt des diverses pratiques de gestion uniquement en fonction de leur impact sur les émissions de gaz à effet de serre. Les autres facteurs qui doivent être pris en considération sont leur faisabilité, leur coût économique, leur effet sur la qualité des sols et leur influence sur l'environnement dans son ensemble (tableau 16). Lorsqu'on tient compte de l'ensemble de ces facteurs, les pratiques proposées s'avèrent en grande partie intéressantes sous tous leurs aspects. Par exemple, la réduction des labours a des effets positifs ou neutres du point de vue de tous les critères envisagés (bien que, de toute évidence, les cotes provisoires indiquées ici puissent varier selon les régions du pays). Certaines pratiques comme l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification présentent de nombreux avantages mais peuvent être limitées par les coûts qu'elles entraînent. La plupart des méthodes proposées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ont également des répercussions favorables sur la qualité des sols et des milieux voisins.

Beaucoup de ces autres facteurs revêtent tout autant d'importance que la lutte contre la pollution atmosphérique. L'adoption des pratiques qui sont proposées ici sera motivée au moins autant par ces considérations que par le désir de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 16 Effets prévus de diverses pratiques agricoles influençant les émissions de gaz à effet de serre

	Gaz à effet de serre			Autres considérations			
Pratiques	CO_2	N_2O	CH_4	Faisabilité	Coûts	Sols	Environnement
Labour limité	++	?	0	+++	+	++	++
Jachère limitée	+++	-	+	++	-	++	+
Gestion améliorée du fumier	0	++	+	++	--	+	++
Rations animales améliorées	-	0	++	+	++	0	0
Drainage et irrigation améliorés	+	++	+	+	+	+	-

\+ bénéfique 0 sans effect - nuisible

Le nombre de (+) ou de (-) indique l'importance des effets

3. Ozone

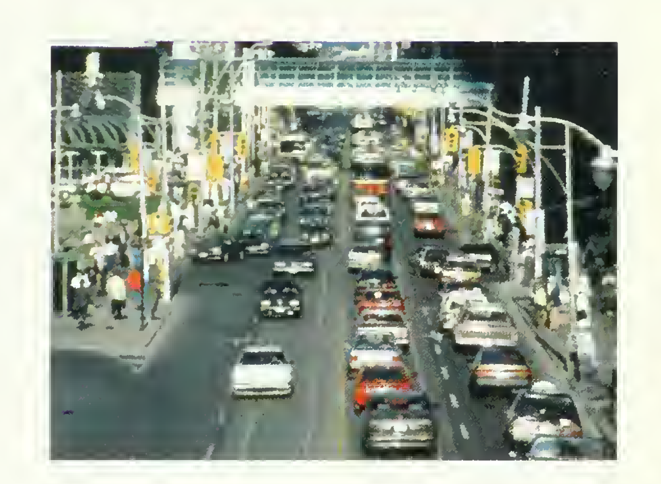
L'ozone est un gaz bleuté dégageant une odeur âcre et irritante. Il est présent naturellement dans la haute atmosphère (« stratosphère »), où il se forme continuellement sous l'action du rayonnement solaire. Contrairement au gaz plus commun qu'est l'oxygène (O_2), le O_3 est très instable et réagit avec d'autres molécules présentes dans l'atmosphère. Sa durée de vie n'est donc que de quelques heures ou quelques jours. Le O_3 de la haute atmosphère joue un rôle utile en filtrant le rayonnement UV nocif. Cependant, les polluants entrant dans la haute atmosphère provoquent un amincissement de la couche de O_3, ce qui entraîne une augmentation de l'intensité du rayonnement UV à la surface de la terre.

L'ozone est aussi présent naturellement au niveau du sol à une concentration allant de 25 à 40 parties par milliard en volume (ppbv). Comme d'autres polluants (p. ex., les oxydes d'azote, les peroxydes, le nitrate de peroxyacétyle et les particules en suspension), l'ozone produit du smog au niveau du sol. Les effets nocifs du smog sur la santé humaine sont assez bien connus, mais ses effets sur les plantes n'ont guère été soulevés dans les médias. Toutefois, selon certaines estimations, le coût annuel des dommages provoqués aux cultures par l'ozone au Canada serait de l'ordre de dizaines de millions de dollars, principalement dans la vallée du Fraser en Colombie-Britannique, dans le corridor Québec–Windsor et dans le sud de la région Atlantique.

L'ozone est un gaz atmosphérique unique : il est fort bénéfique dans la haute atmosphère et constitue un dangereux polluant au niveau du sol. Ironiquement, les activités anthropiques ont entraîné une réduction des quantités d'ozone dans la haute atmosphère et une augmentation de sa concentration au niveau du sol. Dans cette section, nous décrivons le problème que constitue l'ozone au niveau du sol, que nous appellerons ozone troposphérique; les problèmes découlant de la diminution de la concentration d'ozone dans la haute atmosphère seront abordés ultérieurement.

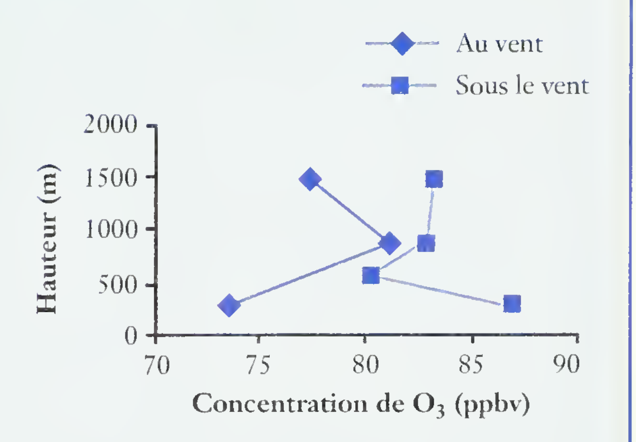
Source d'ozone troposphérique

L'ozone est formé par réaction des oxydes d'azote avec des composés organiques volatils (COV) sous l'action du rayonnement solaire (fig. 25). Des sources naturelles, comme la végétation et les sols, rejettent de faibles concentrations de ces composés. Toutefois, les activités anthropiques ont entraîné un accroissement des quantités émises, soit les COV provenant du pétrole, des industries chimiques et du secteur des transports, et les oxydes d'azote produits par l'utilisation de combustibles dans les centrales thermiques et par l'utilisation de carburants par les automobiles. Les concentrations d'ozone se sont donc accrues, et il y a plus de smog dans les



Mesure des concentrations d'ozone

La concentration d'ozone n'est mesurée qu'à environ 100 endroits au Canada, qui font partie du réseau d'évaluation de la qualité de l'air du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada. Afin d'en déterminer la représentativité, les chercheurs mesurent, lors de vols à basse altitude, les concentrations d'ozone au vent et sous le vent par rapport à la ville de Montréal.



Les concentrations d'ozone étaient, à toutes les altitudes, plus importantes sous le vent qu'au vent. En conséquence, les concentrations d'ozone mesurées par le réseau devront peut-être être corrigées, selon le point de mesure.

(J.I. MacPherson, NRC; R.L. Desjardins, AAC)

Composés organiques volatils et agriculture

Les composés organiques volatils (COV) comprennent les composés chimiques naturels et synthétiques constitués principalement de carbone. Les composés organiques volatils et les oxydes d'azote réagissent sous l'effet de la lumière solaire pour former de l'ozone troposphérique. Dans les zones rurales, les COV sont principalement produits par la végétation. Parmi les cultures qui émettent des COV, on compte les tomates, les pommes de terre, le soja, le blé, la laitue et le riz. Même si les COV synthétiques étaient complètement éliminés, il y aurait quand même formation d'ozone à partir des COV rejetés par la végétation.

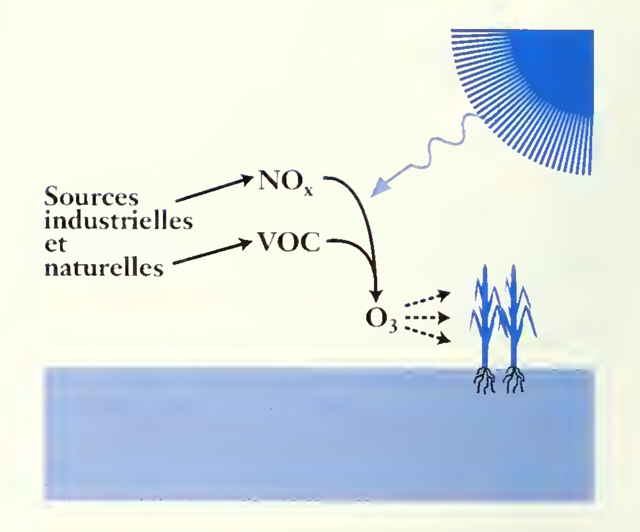


Figure 25

Schéma illustrant la formation du O_3 troposphérique. Les composés organiques volatils (COV), émis dans l'atmosphère par la végétation et les sources artificielles, réagissent avec les NO_x en présence de lumière solaire pour donner du O_3.

Objectifs de qualité de l'air

Les objectifs de qualité de l'air sont des objectifs nationaux relatifs à la qualité de l'air extérieur, visant à protéger la santé des humains et l'environnement. Ces objectifs sont élaborés par des groupes de travail pour divers polluants atmosphériques visés par la Loi canadienne sur la protection de l'environnement. Les groupes de travail analysent les études scientifiques les plus récentes.

L'objectif « maximum acceptable » de qualité de l'air actuellement en vigueur pour l'ozone est de 82 parties par milliard (en volume), pondéré sur une période d'une heure. L'objectif actuellement en vigueur pour l'ozone troposphérique a été établi en 1976 à partir des meilleures informations qui étaient alors disponibles. Il a été confirmé en 1989, mais une nouvelle évaluation des données scientifiques sur l'ozone troposphérique est sur le point d'être terminée.

L'ozone troposphérique a été identifié comme une priorité dans l'Accord d'harmonisation récemment signé par le Conseil canadien des ministres de l'environnement. Les travaux actuellement en cours permettront d'établir une norme à l'échelle du Canada pour les concentrations d'ozone ambiant.

(M. Shepard, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada)

régions très peuplées et les régions industrielles. Les dangers que présente le smog pour la santé et l'environnement ont incité les gouvernements fédéral et provinciaux à imposer des limites aux émissions d'oxydes d'azote et de COV dans l'atmosphère.

Dans les grandes villes canadiennes, on enregistre chaque année pendant plusieurs journées des concentrations d'ozone supérieures au maximum acceptable de 82 ppbv pendant 1 heure.

En Ontario, on a enregistré des valeurs de 170 ppbv à plusieurs endroits. Les conditions atmosphériques stables prévalant au cours de l'été et de l'automne sont particulièrement favorables à la formation de smog. Sous l'action de vents faibles, le smog peut se répandre à grande échelle, touchant souvent des régions entières de chaque côté de la frontière canado-américaine. Le rayonnement solaire étant indispensable à la formation de l'ozone, les concentrations de O_3 tendent à diminuer la nuit, alors que celles des autres constituants du smog ne sont pas modifiées.

Effet de l'ozone sur les plantes

L'ozone pénètre dans les feuilles des plantes par leurs stomates, de petits orifices valvés à la surface de la feuille qui régulent les échanges de gaz entre la plante et l'atmosphère. Durant le jour, les stomates sont normalement ouverts, permettant au CO_2 d'entrer et d'être utilisé pour la photosynthèse. C'est malheureusement durant cette période que les concentrations d'ozone sont les plus élevées.

Une fois à l'intérieur de la feuille, l'ozone oxyde les molécules de la membrane des cellules et provoque ainsi la dégradation de cette membrane. Comme l'ozone est un constituant naturel de l'atmosphère, les plantes se sont dotées de certains mécanismes de protection, comprenant entre autres des « antioxydants », comme les vitamines C et E, et des protéines spécialisées (enzymes) qui réparent les lésions provoquées par le O_3. Cependant, en présence de concentrations d'ozone plus importantes, ces mécanismes de protection sont incapables de prévenir les lésions tissulaires.

L'ozone peut causer dans le tissu de la feuille des lésions directes qui se manifestent souvent par des mouchetures, un bronzage, des taches aqueuses ou un vieillissement prématuré de la feuille. De plus, des concentrations élevées d'O_3 peuvent provoquer la fermeture des stomates, avec pour conséquence l'arrêt du flux de CO_2 et donc de la photosynthèse. Le rendement de certaines plantes peut donc subir une baisse considérable provoquée par les lésions directes et la photosynthèse réduite découlant d'une exposition à long terme à des concentrations élevées d'ozone.

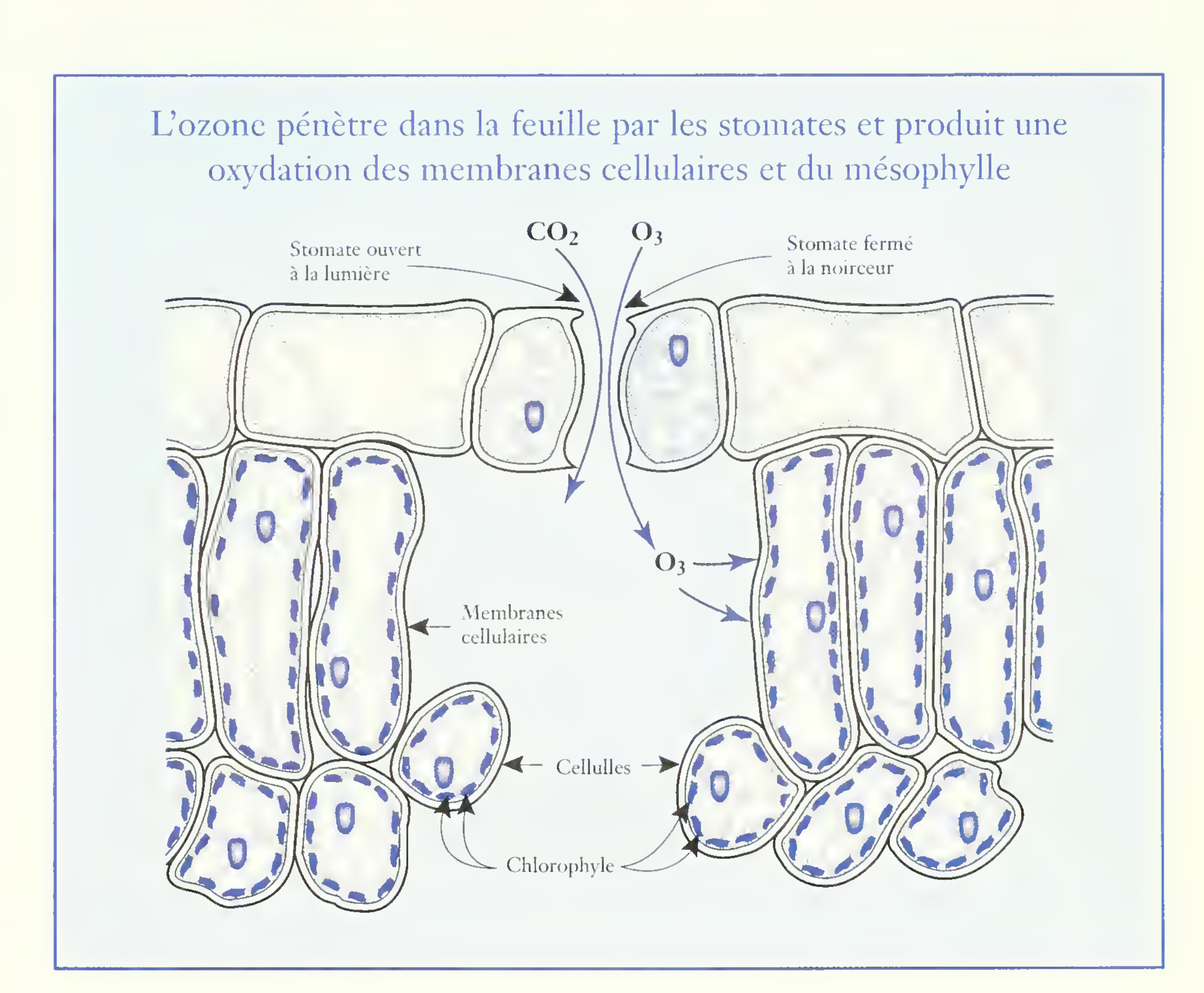
Depuis plus de 40 ans, les chercheurs ont étudié les effets du O_3 sur diverses cultures au Canada et ailleurs, mais les fluctuations des concentrations d'ozone dans l'air pollué rendent très difficile toute estimation fiable des dommages causés par cette substance.

Ozone et stomates des feuilles

L'ozone peut aussi pénétrer dans la plante lors de l'absorption par le stomate du CO_2 destiné à la photosynthèse. L'ozone diminue la turgescence des cellules entourant les stomates, ce qui a pour effet de réduire la taille de l'ouverture et de protéger ainsi la plante contre tout dommage ultérieur par l'ozone. Cependant, une fois à l'intérieur de la feuille, l'ozone est très réactif et peut détruire les cellules de la feuille, ce qui peut réduire considérablement le rendement.



L'ozone pénètre dans la feuille par les stomates et produit une oxydation des membranes cellulaires et du mésophylle



Exposition à l'ozone et absorption par les cultures

Au Canada, les concentrations d'ozone troposphérique sont mesurées régulièrement à des sites de contrôle de la pollution atmosphérique. Toutefois, à elles seules les concentrations ne permettent pas d'évaluer les lésions potentielles chez les plantes. Les plantes sont moins sensibles au cours de la nuit et durant les périodes de croissance plus lente. Leur sensibilité dépend aussi de la température et de l'humidité. On doit donc mesurer la quantité de O_3 réellement absorbée pour évaluer ses effets sur les plantes.

On peut, pour évaluer l'absorption de O_3, mesurer à l'aide de capteurs montés sur des tours les concentrations instantanées d'ozone dans les masses d'air descendante et ascendante. En présence d'une concentration plus élevée dans la masse d'air descendante, il y a absorption de O_3 : plus la différence de concentration entre ces deux masses d'air est grande, plus le taux d'absorption est important. Cette approche permet de mesurer presque en continu les flux de O_3 et ainsi d'obtenir des profils d'absorption journaliers et saisonniers. Par exemple, on a constaté lors d'une étude que le flux de O_3 au-dessus d'un champ de soja augmentait durant le jour puis diminuait rapidement au milieu de l'après-midi quand les stomates commençaient à se refermer (fig. 26). L'ouverture et la fermeture des stomates étant régies par le stress hydrique, il existe une relation étroite entre l'absorption de O_3 et la transpiration (c'est-à-dire, la quantité d'eau perdue par les plantes).

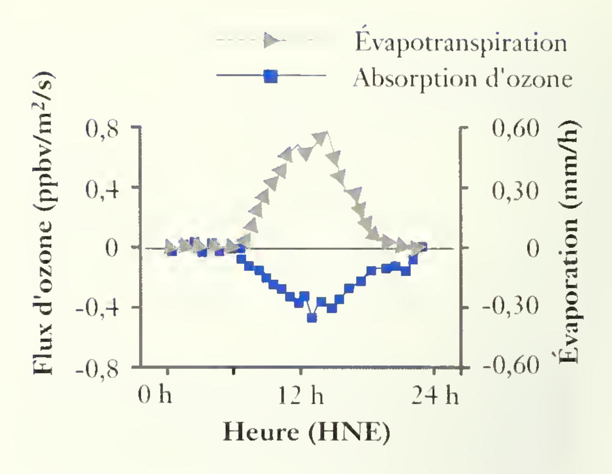


Figure 26

Absorption d'ozone et perte d'eau par du soja pendant une journée ensoleillée au mois d'août à Ottawa. (E. Pattey, AAC)

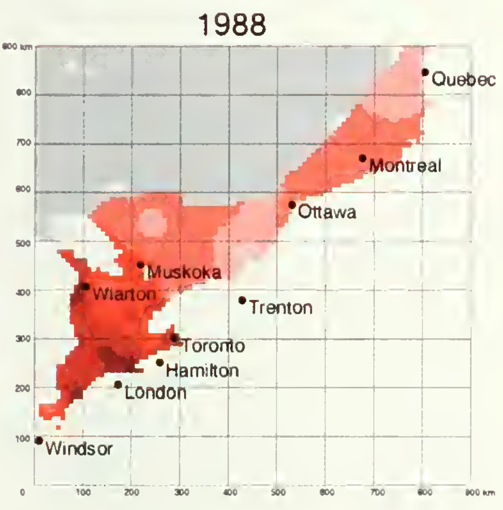
Pour réaliser des mesures à plus grande échelle, on peut embarquer les appareils de mesure à bord d'un aéronef, comme on l'a décrit pour les mesures du CO_2, du N_2O et du CH_4. On a déjà contrôlé le O_3 à partir d'un avion au-dessus de nombreuses cultures, à des fins météorologiques et pour déterminer les concentrations d'ozone. Cette approche a permis de mettre en évidence une relation étroite entre l'absorption de O_3 et la quantité de végétation verte.

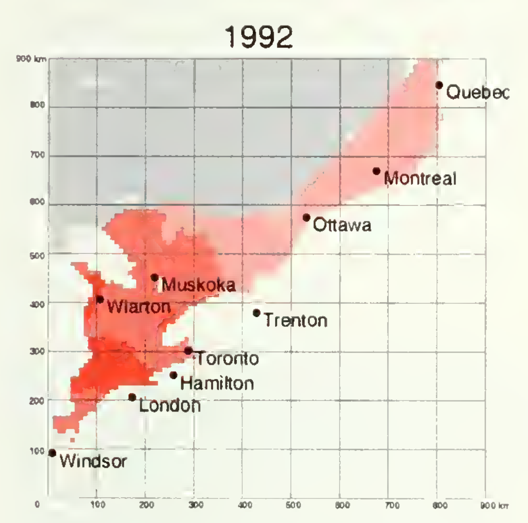
On peut procéder à plus grande échelle encore en utilisant des satellites. Les chercheurs peuvent calculer la transpiration à partir des conditions environnementales et obtenir un indice de « verdure » à partir des images de satellites. Comme l'absorption du O_3 est étroitement liée à la transpiration, on peut l'estimer pour la totalité de la saison de croissance sur de grandes étendues, en utilisant les concentrations de O_3 mesurées par les réseaux de surveillance (p. ex., fig. 27).

Cependant, cette approche ne fait qu'estimer l'absorption moyenne à long terme et ne permet pas de décrire les fluctuations à court terme associées aux variations quotidiennes de stress hydrique ou de croissance végétale. De plus, elle tend à « diluer » les expositions relativement brèves à des concentrations élevées qui risquent de provoquer un

dommage considérable. Ces estimations constituent néanmoins une indication utile des dommages potentiels aux plantes.







Absorption de O_3 (flux) [µg/m²/s]

Figure 27

Estimation des quantités de O_3 absorbées par le soja dans le corridor Windsor–Québec en 1988 et en 1992. (R.L. Desjardins et Y. Guo, AAC)







Enceintes découvertes, système zonal de pollution atmosphérique et biomoniteurs.

Mesure de la réaction des plantes à l'ozone

La manière la plus simple de mesurer la réaction des plantes à la présence d'ozone consiste à les faire pousser dans des enceintes découvertes, à l'intérieur desquelles on introduit continuellement du O_3 à des concentrations simulant les variations journalières. Cette méthode permet aux chercheurs d'évaluer les effets de plusieurs concentrations de O_3 (jusqu'à trois fois la concentration dans l'air extérieur), ainsi que les effets d'autres gaz ou d'autres polluants que l'on peut introduire simultanément.

Dans une approche plus complexe, appelée « système zonal de pollution atmosphérique » (système ZAPS), une série de tuyaux disposés au-dessus des plantes rejette continuellement du O_3 sur le feuillage, à différents taux dans différentes parcelles. Cette méthode permet d'éviter certaines des conditions artificielles existant à l'intérieur des enceintes, mais elle est plus coûteuse. De plus, comme il y a mélange continu avec de l'air non traité, l'enrichissement maximal réalisable grâce à cette technique n'est guère élevé.

Les enceintes découvertes et les systèmes ZAPS sont utiles pour effectuer des recherches détaillées, mais elles ne permettent pas d'obtenir de l'information sur les dommages causés par le O_3 à grande échelle. Des réseaux de surveillance enregistrent en permanence les concentrations d'ozone dans de nombreuses régions peuplées. En milieu rural, par contre, ces réseaux sont rares. Afin d'obtenir de l'information sur ces zones, les chercheurs utilisent des « biocapteurs » ou des capteurs « passifs ». Les biocapteurs sont des plantes très sensibles à l'ozone, comme la variété de tabac « Bel-W3 ». On les plante un peu partout dans une région, puis on les inspecte pour voir s'il y a présence de mouchetures de tissus morts, qui sont des symptômes de lésions causées par le O_3. Les biocapteurs permettent donc d'estimer le taux d'absorption d'ozone par les feuilles et donnent une indication des dommages potentiels subis par les cultures moins sensibles, même si ces dernières ne présentent aucun signe visible de stress. Les capteurs passifs sont

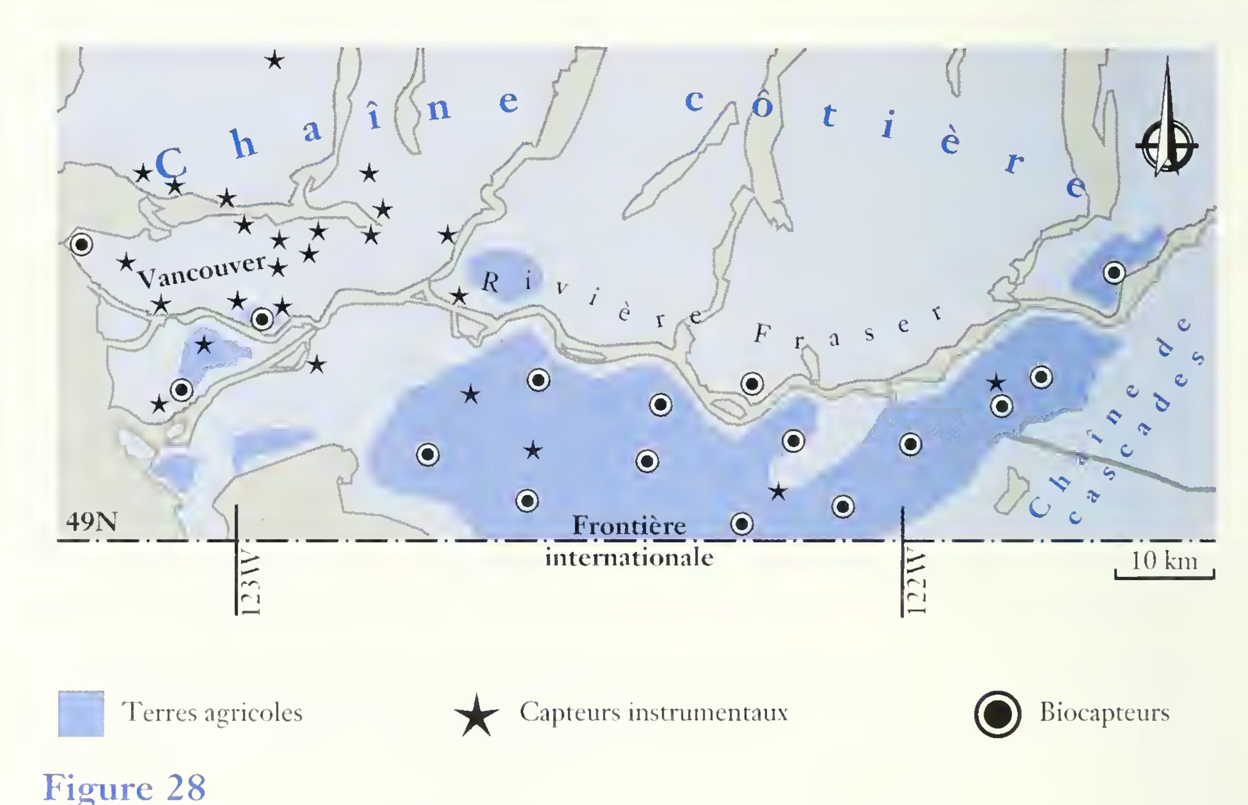
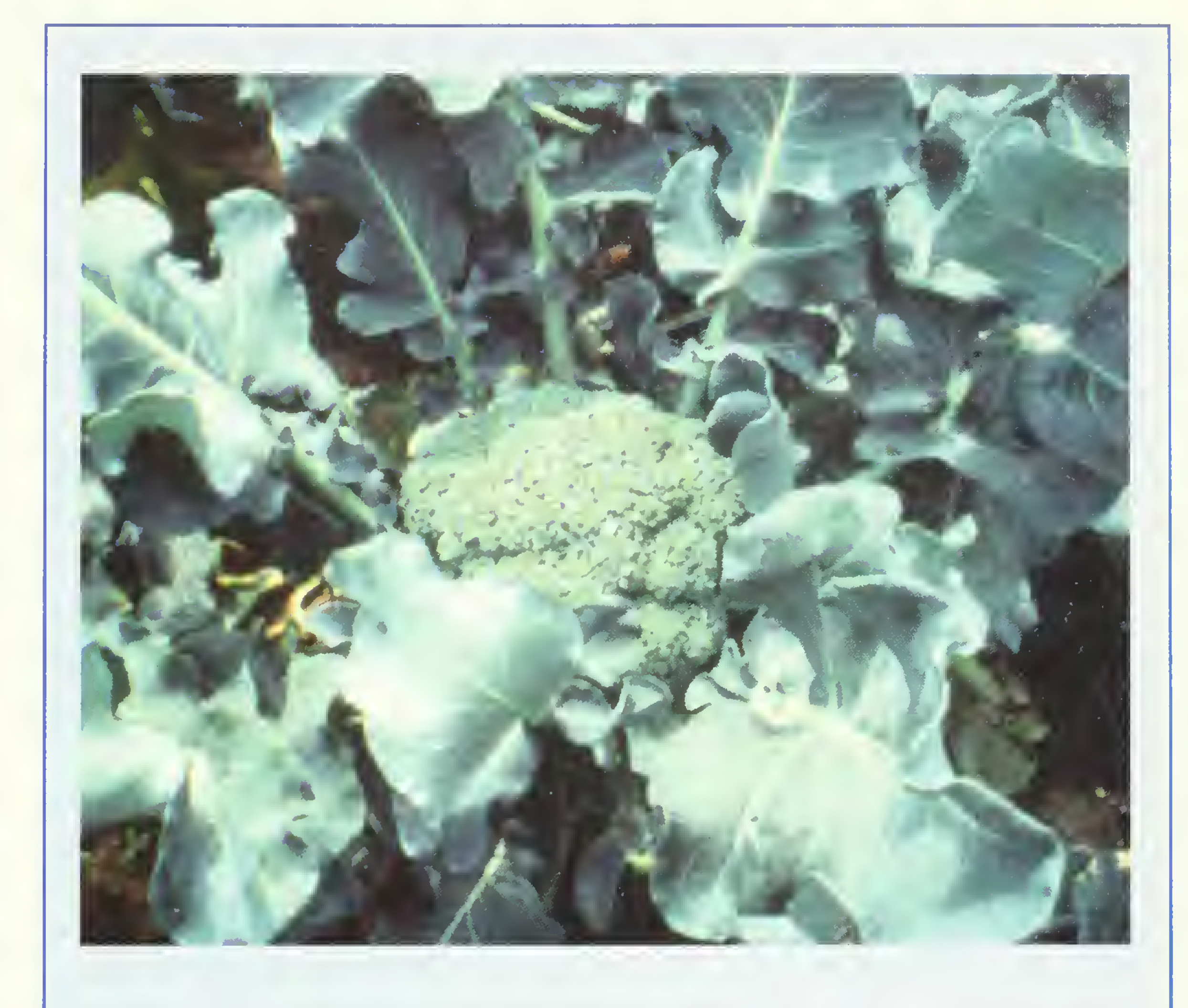


Figure 28

Carte indiquant l'emplacement des capteurs d'ozone dans la vallée du Fraser (C.-B.) (P. Bowen, AAC)

de simples filtres en papier traités avec un colorant indigo. Le colorant change de couleur en présence d'ozone et l'importance de ce changement constitue un indice de l'exposition totale à l'ozone au cours de la période considérée.

En plaçant ces capteurs parmi d'autres plantes dans un système ZAPS, on peut établir une relation entre les observations faites à l'aide de biocapteurs et de capteurs passifs et les effets potentiels sur les cultures. On peut alors établir une relation directe entre les dommages subis par les cultures et la présence de « mouchetures » sur les feuilles des plantes utilisées comme biocapteurs ou le changement de couleur observé sur les capteurs passifs. Grâce à ces relations, les chercheurs peuvent se servir de biocapteurs et de capteurs passifs installés un peu partout dans une région pour évaluer les effets de l'absorption d'ozone sur les rendements dans cette région. Les chercheurs se sont servis d'un vaste réseau de ce type de capteurs pour surveiller les effets de l'ozone sur les rendements dans la vallée du Fraser, une zone très peuplée où l'on pratique l'agriculture intensive (fig. 28).



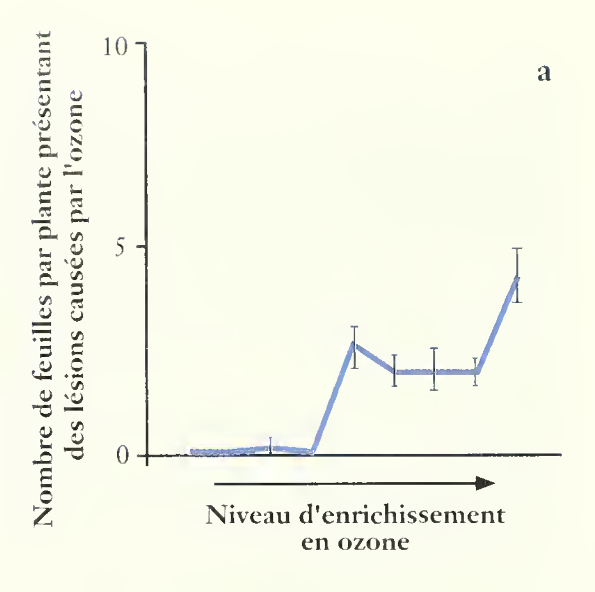
Le brocoli est une plante sensible à l'ozone.

Exemples de la réaction des cultures à l'ozone

L'effet du O_3 a déjà été l'objet de nombreuses études, et il existe maintenant certaines revues d'envergure qui peuvent être consultées. Nous en présentons quelques exemples ci-après pour illustrer la nature et les objectifs de certaines recherches récentes.

Effet de l'ozone sur le brocoli

Le brocoli est une culture de grande valeur, que l'on récolte environ 6 à 8 semaines après la transplantation. La croissance rapide des feuilles après la transplantation alimente la pomme qui se développe. Toute exposition des feuilles à un stress au cours de cette période se traduit par des pommes plus petites et, donc, par des rendements moindres. Des études réalisées à l'aide d'un système ZAPS ont montré que l'ozone provoque des lésions aux feuilles de deux manières : il tue une partie des tissus directement (fig. 29a) et rend d'autres tissus sensibles au mildiou, une maladie fongique (fig. 29b). L'importance des lésions a été directement attribuée à l'enrichissement par l'ozone.



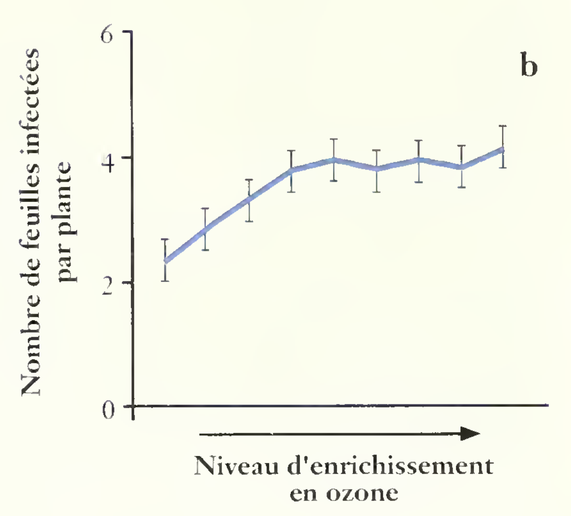


Figure 29

Réaction du brocoli à l'ozone :
a) lésions causées par l'ozone sur les feuilles de brocoli;
b) brocoli exposé à l'ozone dont les feuilles sont infectées par le mildiou. (V.C. Runeckles, Université de Colombie-Britannique, Vancouver) (C.-B.)

Effet de l'ozone sur le dactyle pelotonné

Le dactyle pelotonné constitue la principale source de nourriture des vaches laitières dans la vallée du Fraser. Le dactyle, qui servira de foin, peut être récolté jusqu'à cinq fois par année. Les pertes de rendement au moment de la récolte dépendent des expositions à l'ozone subies au cours de la période de croissance précédente. Lors d'une étude, on a examiné la relation entre les concentrations d'ozone et les rendements en dactyle pelotonné dans un système ZAPS (fig. 30). Les données mettent en évidence une diminution de rendement au fur et à mesure de l'accroissement de l'exposition (signalée comme étant le nombre de jours durant lesquels les concentrations horaires étaient supérieures à 50 ppbv). Le dactyle pelotonné étant une plante vivace, sa croissance au début du printemps dépend des réserves emmagasinées dans ses racines et ses tiges au cours de la saison de croissance précédente. Des études réalisées lors d'années successives ont montré que l'exposition des plantes à l'ozone au cours de l'automne réduisait le rendement le printemps suivant.

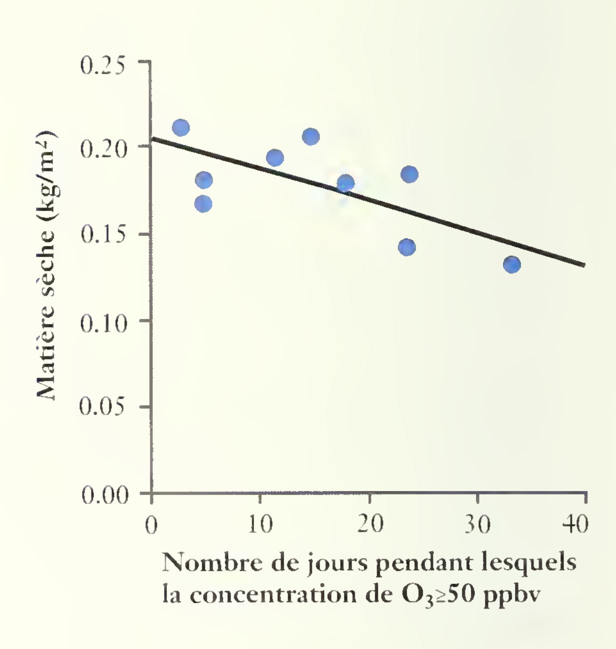


Figure 30

Rendement en matière sèche du dactyle pelotonné en fonction de l'exposition à l'ozone. (V.C. Runeckles, Université de Colombie-Britannique)

Effet de l'ozone sur les fraises

Une exposition accrue des plants de fraises à l'ozone entraîne une réduction du nombre et du poids de fruits utilisables. On a déterminé, grâce à un réseau de capteurs passifs installés dans la vallée du Fraser, que les pertes en fruits pouvaient atteindre 15 %.

Effet de l'ozone sur les laitues

La valeur marchande de cultures comme la laitue dépend de l'aspect visuel des feuilles. Lors d'études sur l'exposition à l'ozone, les laitues semblaient en bon état même aux concentrations les plus élevées. Mais, l'ozone réduisait la taille et le poids des pommes, une indication que les dommages causés par le O_3 peuvent être subtils et détectables uniquement après un examen minutieux.

Effet combiné de l'ozone et du dioxyde de carbone sur la luzerne

La luzerne pousse plus lentement et résiste moins à l'envahissement par les mauvaises herbes lorsqu'elle est exposée à des concentrations élevées d'ozone. Tout comme le dactyle pelotonné, la luzerne exposée à du O_3 au cours de l'automne pourra accuser un rendement moindre l'année suivante. Toutefois, sa capacité de survivre à des hivers froids ne semble pas modifiée. Lors d'une étude, on a mesuré les effets de concentrations accrues de O_3 et de CO_2 sur la croissance de la luzerne. L'accroissement de la concentration de CO_2 augmente en fait la tolérance de la luzerne aux concentrations élevées de O_3 (fig. 31), probablement parce que les stomates sont partiellement fermés en présence de concentrations élevées de CO_2. Cette constatation pourrait avoir d'importantes conséquences si, comme on le prévoit, la concentration de CO_2 atmosphérique double au cours du prochain siècle.

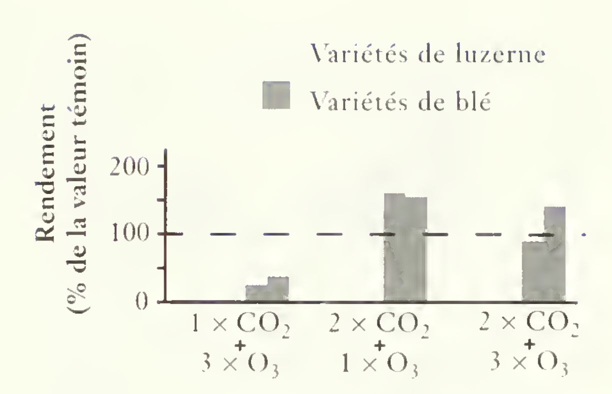


Figure 31

Effets relatifs du O_3 et du CO_2 sur le rendement de la luzerne et du blé. Les valeurs dans la légende correspondent à la concentration mesurée par rapport à la concentration de fond. (G. Allard, Université Laval)

Tolérance à l'ozone des diverses variétés

Les plantes ont une tolérance à l'ozone atmosphérique qui peut varier considérablement, même chez les diverses variétés d'une même culture. L'étude de deux variétés de luzerne, « Apica » et « Team », dans des enceintes découvertes a montré que la variété « Apica » n'était pas endommagée par de faibles concentrations d'ozone, mais qu'elle l'était fortement par des concentrations élevées, et ce, pendant les deux années de l'étude. La variété « Team » n'était pratiquement pas touchée lorsque l'été était frais et pluvieux, mais elle était touchée presque aussi gravement que la variété « Apica » lorsque l'été était chaud et ensoleillé. Lors d'une étude semblable, les variétés de blé de printemps « Bluesky » et « Opal » ont été exposées à de l'air exempt de O_3 et à de l'air dont la concentration d'ozone était 1,0, 1,5 et 3,0 fois la concentration ambiante de O_3 (fig. 32). La variété « Opal » semble plus tolérante à l'ozone. La tolérance était différente au cours des deux années de l'étude, ce qui permet de penser que non seulement les différentes variétés ont des tolérances différentes, mais que les conditions climatiques influent également sur la tolérance.

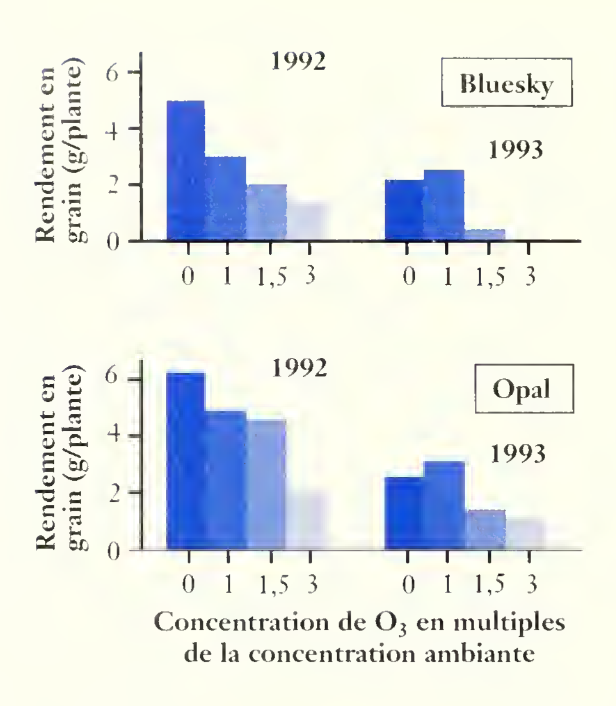


Figure 32

Rendement de deux cultivars de blé en présence de concentrations croissantes d'ozone. (G. Allard, Université Laval)

Les nouvelles variétés de culture tolèrent mieux les maladies, sont mieux adaptées aux conditions locales et permettent en général d'obtenir des rendements plus élevés. Ces variétés donnent-elles aussi de meilleurs résultats en présence de concentrations élevées de O_3? Lors d'une étude, on a comparé la tolérance à l'ozone de variétés de blé utilisées à partir de différentes époques, depuis les années 1950 (quand les concentrations de O_3 étaient généralement faibles) jusqu'au début des années 1990. En présence des concentrations actuelles d'ozone, les nouvelles variétés avaient un rendement accru, mais ce rendement diminuait à des concentrations plus élevées. On peut expliquer ce comportement de la façon suivante : comme les nouvelles variétés ont besoin de plus de CO_2 pour entretenir un taux photosynthétique plus élevé, leurs stomates restent ouverts plus longtemps et absorbent ainsi une plus grande quantité de O_3. On peut aussi l'expliquer par le fait que le rapport grain/feuille plus élevé des nouvelles variétés entraîne un rendement accru. Disposant d'une surface de feuille relativement moindre pour absorber le CO_2 et produire les grains, ces variétés peuvent présenter des lésions plus importantes aux feuilles causées par l'ozone.

Interactions environnementales

Malheureusement, les cultures sont rarement exposées à un seul polluant. Les plantes croissant dans un milieu où la concentration de O_3 est élevée peuvent aussi subir des lésions causées par le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les pluies acides et le rayonnement UV. L'effet net d'une exposition à plusieurs polluants peut être égal, supérieur ou inférieur à la somme des effets des expositions individuelles. De plus, les effets dépendent du type de culture, de la période d'exposition, des conditions météorologiques, des expositions précédentes et d'autres stress environnementaux. Les études récentes n'ont donc fourni que certaines connaissances limitées sur les effets potentiels de l'ozone sur quelques cultures d'importance dans certaines régions.

4. Autres liens entre l'agriculture et l'atmosphère

Le CO_2, le N_2O, le CH_4, et le O_3 ont soulevé beaucoup d'attention récemment, mais l'agriculture rejette d'autres matières dans l'atmosphère, parmi lesquelles on compte l'ammoniac, d'autres odeurs, des aérosols, des oxydes d'azote et des pesticides. L'agriculture pourrait aussi être touchée par des variations du O_3 stratosphérique. Bon nombre de ces problèmes n'ont pas encore fait l'objet d'une étude approfondie au Canada. Notre but principal est d'identifier les problèmes potentiels et d'indiquer quelques-uns de leurs effets possibles.

Ammoniac

Les techniques agricoles actuelles misent fortement sur l'apport d'azote, dont la majeure partie provient en fin de compte du N_2 atmosphérique. Cette importante contribution permet de soutenir la production de nourriture, mais elle constitue aussi un stress pour le cycle naturel de l'azote, entraînant dans l'environnement « des fuites » de N sous forme d'émissions de N_2O et d'ammoniac (NH_3).

Contexte

À l'échelle globale, l'agriculture constitue la principale source d'ammoniac atmosphérique d'origine anthropique. La plus grande partie de ce NH_3 provient de l'élevage. Dans certaines parties d'Europe, aux Pays-Bas notamment, les émissions de NH_3 associées à l'élevage sont si importantes qu'elles ont justifié la mise en place de règlements stricts. Au Canada, le problème n'est pas encore grave, sauf peut-être localement dans certaines zones où le cheptel compte beaucoup d'animaux.

L'ammoniac est un gaz incolore, plus léger que l'air, dégageant une odeur âcre. Dans les zones éloignées des sources, sa concentration atmosphérique est très faible (moins de 0,01 ppmv). Cependant, dans les zones proches des opérations intensives d'élevage, les concentrations peuvent être beaucoup plus importantes, parfois bien au-dessus du seuil olfactif (~ 0,6 ppmv).

Contrairement au N_2O, le NH_3 est hautement réactif et sa durée de vie dans l'atmosphère est courte. Il réagit rapidement avec l'eau pour former de l'ammonium (NH_4^+). Toute surface humide ayant un pH neutre ou acide—sol, plantes ou plan d'eau—éliminera donc le NH_3 contenu dans l'air. Dans l'atmosphère, le NH_3 peut se dissoudre dans les précipitations et atteindre le sol sous forme de NH_4^+; il peut aussi être oxydé ou dissocié par le rayonnement solaire. L'ammoniac peut également réagir avec des polluants, comme les sulfates et les nitrates acides et former ainsi de minuscules particules de nitrate d'ammonium ou de sulfate d'ammonium. En raison de la si grande réactivité du NH_3, ce n'est que localement qu'on le retrouve en concentrations élevées; les concentrations de cette substance sont élevées près des sources d'émission et presque négligeables ailleurs. Par exemple, près de Lethbridge (Alberta), les concentrations étaient élevées près des parcs d'engraissement, mais relativement faibles à 1 km de là.

Présent en concentration élevée, l'ammoniac produit de nombreux effets indésirables. Près des sources d'émission, où les concentrations sont importantes, il produit une odeur désagréable et peut avoir des effets nocifs sur la santé des humains et des animaux. Les dépôts locaux d'émissions d'ammoniac peuvent « fertiliser » le sol, mais des quantités excessives peuvent entraîner le lessivage du N et contaminer les eaux souterraines ou les eaux de surface. Un excès de NH_3 peut même être converti en N_2O et contribuer ainsi indirectement à l'effet de serre.

Même si bon nombre de ses effets se manifestent localement, l'ammoniac produit aussi des effets à distance. Les particules d'ammonium, formées par réaction avec d'autres composés azotés ou soufrés, peuvent être transportées sur de longues distances par les vents, avant de se déposer. Comme le N est souvent un nutriment qui limite la croissance, les dépôts de ce NH_4^+ peuvent modifier de façon non souhaitable la croissance dans les lacs, modifier la croissance des forêts ou perturber des écosystèmes sensibles. Lorsqu'il se dépose sur des prairies peuplées d'espèces indigènes, le NH_3 ou le (NH_4^+) atmosphérique peut, par exemple, favoriser la croissance de certaines espèces au détriment d'autres et ainsi modifier la composition. Le NH_3 atmosphérique peut aussi entraîner une acidification, car il augmente la vitesse à laquelle le dioxyde de soufre (SO_2) se convertit en acide sulfurique et forme des pluies acides. Déposé sur le sol sous forme de NH_4^+, l'ammoniac produit de l'acide par nitrification.

En raison de ses nombreux effets potentiels, tant près des sources d'émission que dans des endroits éloignés, le NH_3 peut être un polluant dangereux; il y a donc lieu de prendre des mesures visant à réduire les émissions de cette substance. Toutefois, avant d'examiner les moyens possibles de réduire ces émissions, il pourrait être utile de revoir brièvement les sources de NH_3 d'origine agricole.

Sources d'ammoniac d'origine agricole

Les rejets animaux, les fertilisants et les résidus de cultures constituent les trois principales sources d'ammoniac d'origine agricole. Parmi ces trois sources, les rejets animaux sont responsables d'environ 80 % des émissions par le secteur de l'agriculture.

Les animaux de ferme n'assimilent qu'une petite proportion (environ un cinquième) de l'azote qu'ils consomment avec la nourriture, le reste étant excrété dans les matières fécales et l'urine. Une partie de cet N (en particulier dans l'urine) se retrouve sous forme d'urée, qui peut être facilement convertie en NH_3 et en CO_2. Une grande proportion de l'azote se retrouvant dans le fumier peut donc, après excrétion, être rapidement perdue sous forme de NH_3. Dans les fermes porcines, par exemple, de 40 à 95 % de l'azote excrété peut être perdu avant l'épandage du fumier sur les champs. Une bonne partie de ces pertes, peut-être de 10 à 40 %, peuvent survenir dans la porcherie, même avant l'entreposage. En comparaison des pertes par le fumier de porc, les pertes d'ammoniac par le fumier de bovin sont souvent moindres et représentent probablement moins de 50 % de la teneur totale en N.

Selon la méthode d'entreposage du fumier, les pertes de N peuvent aussi être importantes. Dans une étude réalisée aux É.-U., environ 60 à 80 % de l'azote contenu dans le fumier de porc entreposé dans des cuves à déjection à ciel ouvert était perdu, comparativement à des pertes de 30 à 65 % dans le cas du fumier entreposé dans des réservoirs souterrains puis épandu ultérieurement à l'état liquide. Selon une autre estimation, la proportion d'azote contenue dans le fumier de porc et perdue sous forme de NH_3 est inférieure à 10 % dans les systèmes d'entreposage anaérobies, de 10 à 25 % dans les systèmes semi-aérobies et de 25 à 85 % durant le compostage. Ces différences reflètent le degré d'exposition à l'air et les quantités d'eau et d'acide présentes.

Il y a également pertes d'ammoniac lorsque le fumier est épandu, en particulier quand un lisier est appliqué par pulvérisation. La plus grande partie est perdue juste après l'épandage. On a montré, par exemple, lors d'une étude sur les pertes de NH_3 contenu dans le fumier de bovin, que plus de la moitié des émissions totales d'ammoniac survenaient dans la journée suivant l'épandage (fig. 33).

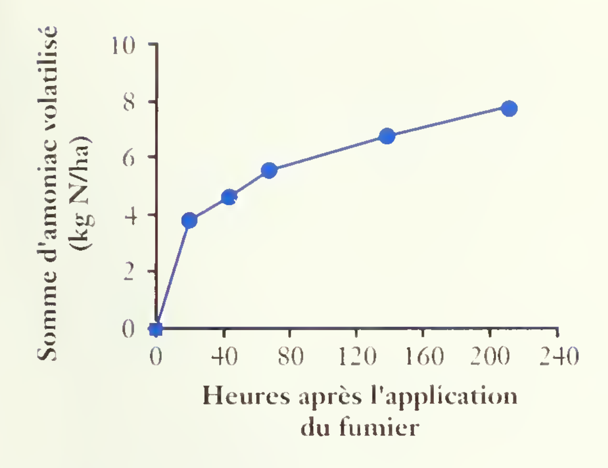


Figure 33

Émissions de NH_3 par le fumier appliqué à la surface du sol. (S. McGinn, AAC)

Les fertilisants constituent une autre source potentielle de NH_3. Deux formes largement utilisées au Canada sont particulièrement importantes : l'ammoniac anhydre (NH_3 pur) et l'urée. Lorsqu'on injecte de l'ammoniac anhydre dans le sol, celui-ci est normalement converti immédiatement en NH_4^+ par l'humidité du sol, puis est solidement retenu sous cette forme par le sol. Cependant, si le sol est extrêmement sec, on peut perdre jusqu'à 20 % du NH_3. D'autre part, si le sol est mouillé au point qu'il ne se referme pas après l'injection, les pertes peuvent atteindre 50 %. L'urée utilisée comme fertilisant, tout comme l'urée contenue dans le fumier de bovin, est rapidement convertie en NH_3 et en CO_2 après l'application. De grandes quantités de NH_3 peuvent être émises dans l'atmosphère si le fertilisant n'est pas mélangé avec le sol.

Les résidus de cultures constituent une troisième source possible de NH_3 d'origine agricole. La décomposition de résidus riches en N, comme les engrais verts de légumineuses, peut produire des quantités importantes de NH_4^+. Si on laisse ces résidus se décomposer sur le sol, une partie du NH_4^+ produit peut se transformer en NH_3 et être perdue dans l'atmosphère.

À partir des données obtenues pour 1990, on estime que les émissions totales de NH_3 au Canada sont d'environ 520 Gg (milliers de tonnes) de N par an. Environ 90 % de ces émissions proviennent des activités agricoles, principalement de l'élevage (tableau 17). Toutefois, ces estimations ne sont que préliminaires pour le moment.

Réduction des émissions d'ammoniac

Les émissions agricoles de NH_3 dans les fermes peuvent être réduites grâce à différentes méthodes qui, en général, consistent à absorber le NH_3 dans de l'eau ou dans un acide, à prévenir l'excrétion excessive de N par les animaux ou à réduire au minimum l'exposition à l'air des sources de NH_3. Voici des exemples spécifiques :

Tableau 17 Estimation des émissions d'ammoniac par les animaux et les fertilisants, en 1990

Source	Émissions de NH_3 (Gg N)
Animaux	
Bétail laitier	inclus avec les bovins
Bovins de boucherie	211
Porcs	76
Volaille	88
Moutons/agneaux	2
Chevaux	4
Total pour les animaux	381
Fertilisants	
Urée	71
Sulfate d'ammonium	2
Nitrate d'ammonium	2
Ammoniac anhydre	4
Solutions azotées	2
Phosphates d'ammonium	6
Total pour les fertilisants	87
Total pour l'agriculture	468

Utilisation de méthodes améliorées de fertilisation : Les agriculteurs peuvent réduire les pertes d'ammoniac par les fertilisants en s'assurant qu'il y a un bon contact entre le fertilisant et le sol humide. L'urée devrait être appliquée sous la surface du sol ou être incorporée dans le sol par labour immédiatement après son application en surface. L'injection d'ammoniac anhydre à une profondeur suffisante dans un sol humide prévient toute diffusion vers la surface.

Réduction au minimum des excrétions de N par les animaux : La réduction de la quantité de N dans le fumier constitue la manière la plus simple de diminuer les émissions de NH_3 par les déjections animales. On ne peut pas empêcher les animaux d'excréter de l'azote, mais les fermiers peuvent réduire la teneur en N du fumier en utilisant des rations alimentaires mieux équilibrées en N, en s'assurant que la nourriture ne contient pas une quantité excessive d'azote ou encore, si possible, en ajoutant à la nourriture des bactéries favorisant la conversion de l'acide urique (un précurseur de l'urée) en nitrate. La mise en application de ces méthodes dans les élevages de bovins, de porcs ou de poulets peut entraîner des réductions de l'azote excrété pouvant atteindre 25 %. En fait, selon les résultats de simulations réalisées grâce à des modèles, pour les conditions observées au Québec, une meilleure alimentation pourrait entraîner une réduction pouvant atteindre 60 % de la teneur en N du lisier de porc. On peut aussi réduire indirectement les excrétions de N en utilisant des races d'animaux, des préparations alimentaires et d'autres méthodes qui améliorent la performance des animaux et, partant, qui augmentent le rendement par unité de N dans le fumier.

Amélioration de la manutention du fumier dans les étables : Des quantités importantes de NH_3 peuvent être émises dans les étables lorsque le fumier est exposé à l'air. Les fermiers peuvent réduire au minimum cette exposition en enlevant le fumier fréquemment; en nettoyant l'étable avec de l'eau, qui réagit avec le NH_3; en recueillant les déjections liquides dans des rigoles étroites et profondes, afin de réduire la surface exposée; et en maintenant toujours une épaisse couche de litière dans les poulaillers. On peut aussi réduire les émissions de NH_3 gazeux en maintenant une température fraîche. En Europe, les changements apportés dans les méthodes de manutention (y compris l'alimentation) ont entraîné une réduction de 45 % des émissions de NH_3 par les porcheries.

Entreposage amélioré du fumier : Les fermiers peuvent réduire les pertes d'ammoniac au cours de l'entreposage du fumier en réduisant au minimum l'exposition à l'air et en abaissant la température. On peut, par exemple, réduire ces pertes en recouvrant les bassins ou les réservoirs contenant du lisier de porc d'une couche d'huile minérale, de paille ou de tourbe. Des couvertures placées sur les réservoirs peuvent réduire de deux tiers les pertes de NH_3, tandis qu'une mince couche d'huile minérale déposée sur le lisier peut réduire de plus de 30 % les pertes. L'addition d'acides au fumier ou l'application d'une couche de tourbe légèrement acide sur du fumier en compostage peut aussi réduire les pertes de NH_3. L'ammoniac est rapidement absorbé et retenu par l'acide, ce qui empêche son dégagement dans l'atmosphère. Les fermiers peuvent obtenir des réductions d'au moins 75 % en utilisant de la mousse de tourbe, de l'acide sulfurique ou de l'acide phosphorique au cours de l'entreposage.

Utilisation de méthodes d'épandage plus efficaces : On peut réduire au minimum les pertes de NH_3 en prenant soin de mélanger rapidement et efficacement le fertilisant au sol. Par exemple, le labour ou l'irrigation du sol immédiatement après l'épandage réduit considérablement les émissions (fig. 34). Les fermiers peuvent aussi réduire les pertes en épandant le fumier avant une période de pluie, en injectant le lisier directement dans le sol ou en utilisant un lisier dilué pour l'irrigation. Lorsqu'on doit épandre

un lisier sur des prairies, on peut réduire les pertes en procédant à des épandages en bandes plutôt qu'à une application par pulvérisation. Enfin, puisque le taux de perte gazeuse dépend de la température, l'application de NH_3 par temps frais (mais non sur un sol gelé) peut réduire les émissions.

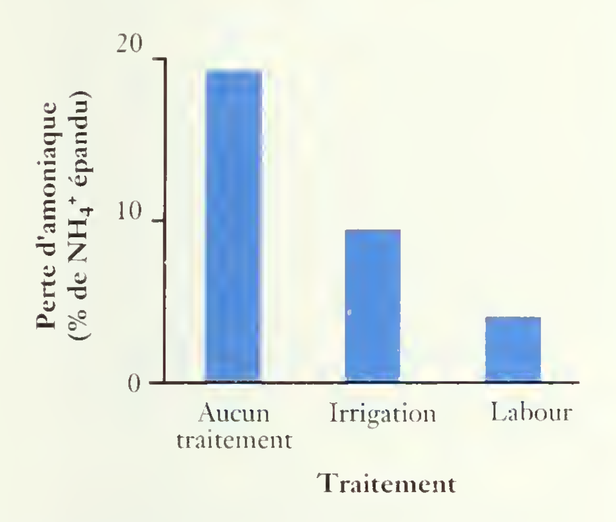


Figure 34

Effet de l'irrigation ou du labour sur la proportion de NH_4^+ présent dans le fumier, qui est volatilisée dans les huit jours suivant l'épandage. (S. McGinn, AAC)

Cette liste décrit plusieurs méthodes permettant de réduire les émissions de NH_3 dans le secteur agricole. Ces méthodes ne sont pas toutes pratiques ni même souhaitables dans tous les cas. Par exemple, l'incorporation du fumier lors du labourage n'est pas compatible avec les systèmes sans labour préconisés ailleurs. Néanmoins, étant donné le nombre d'options disponibles, il est probablement plus facile de réduire de manière importante les émissions de NH_3 que les émissions d'autres gaz, notamment le N_2O. Étant donné l'attention que l'on porte de plus en plus aux problèmes relatifs à la santé, à l'environnement et aux odeurs associés au NH_3, il est probable que les efforts faits pour obtenir de telles réductions iront en grandissant.

Compostage

Parmi les gaz émis lors du compostage de déchets organiques, on compte le CO_2, le NH_3, le CH_4, le N_2O et le NO. De plus faibles quantités de composés soufrés ou azotés réduits peuvent aussi être produites dans les microsites anaérobies. Le type et la quantité de composés gazeux émis au cours du compostage dépendent de la matière compostée et de la méthode de compostage utilisée. On peut éliminer pratiquement tous les composés odorants grâce à un système de ventilation approprié. L'utilisation d'un système de biofiltration dans des installations fermées de compostage permet aussi de rendre inodore l'air évacué.

On peut aussi éliminer les émissions de méthane à l'aide d'un système d'aération adéquat. On peut limiter les émissions d'ammoniac en réglant le rapport C/N dans la matière compostée et en utilisant un système d'aération approprié. Les émissions d'ammoniac se produisent en général au début du processus de compostage. On peut les piéger à l'aide d'un épurateur. On comprend mal les facteurs qui influent sur les émissions de N_2O et de NO lors du compostage. Les chercheurs essayent de mieux comprendre le processus à l'origine des émissions de N_2O lors du compostage et tentent d'élaborer des stratégies qui permettraient de les réduire le plus possible. Une installation de compostage bien conçue ne devrait pas nuire à la qualité de notre air.



(J. Paul, AAC)

Aux Pays-Bas, on a décidé que les émissions de NH_3 en l'an 2000 devraient être d'au plus 50 % de celles en 1980. Dans certaines parties de ce pays, le dépôt annuel de N a atteint 85 kg/ha. Bien que le taux de dépôt au Canada soit en général beaucoup plus faible, il est possible que certaines zones locales d'élevage intensif connaissent déjà de forts taux de dépôts.

Autres sources d'odeur

L'ammoniac n'est qu'un des gaz dégageant une odeur désagréable émis par les exploitations agricoles. Beaucoup d'autres gaz nous irritent le nez, dont certains ne sont pas seulement désagréables mais aussi nocifs. Le plus connu est probablement le sulfure d'hydrogène (H_2S), un gaz toxique dégageant une odeur d'oeuf pourri. Des quantités importantes de ce gaz sont émises lorsqu'on agite les réservoirs contenant du lisier de porc. Ce gaz peut être mortel pour les humains, mais seulement en concentrations élevées dans les endroits mal ventilés. Bien que non toxiques, beaucoup d'autres composés ont une odeur désagréable. On en a identifié plus de 150 juste dans le lisier de porc.

Jusqu'à présent, les odeurs dégagées par les exploitations agricoles étaient perçues uniquement comme une nuisance, mais on prend de plus en plus conscience de ce problème. En effet, certains pays ont déjà adopté des règlements limitant l'intensité de telles odeurs.

Les gaz malodorants peuvent provenir de nombreuses sources. Certains des plus désagréables sont produits par la décomposition de matières organiques en l'absence d'oxygène. La matière en décomposition peut être du fumier, l'effluent s'écoulant des tas de fumier, des produits d'ensilage, des résidus de plantes ou toute une gamme d'autres matières organiques. Lorsque ces matières se décomposent dans un milieu ne contenant pas une quantité suffisante d'oxygène, elles ne sont pas complètement décomposées en CO_2 et en sels simples, mais plutôt en divers composés intermédiaires comme des acides organiques, des alcools, des aldéhydes, des sulfures et du CH_4. Parmi ces composés, ce sont les acides organiques volatils qui dégagent l'odeur la plus désagréable.

Beaucoup de composés malodorants proviennent de la même source et sont donc émis simultanément. Par exemple, on retrouve souvent des acides organiques volatils avec du NH_3 et du H_2S. Étant donné le nombre de composés en cause, il n'est pas facile de mesurer et de quantifier les odeurs. En fait, le capteur le plus sensible et le plus sûr est encore le nez. Une manière de mesurer l'intensité d'une odeur consiste à compter le nombre de fois qu'il faut diluer un échantillon d'air pour rendre son odeur imperceptible. On fait appel à un groupe d'évaluateurs pour déterminer le nombre de « dilutions jusqu'au seuil olfactif » (DT), qui peut varier de 0 à plus de 200. Sur cette échelle, une valeur de 170 DT ou plus est considérée « inacceptable ». La plus petite valeur que l'on puisse obtenir dans un parc d'engraissement est d'environ 7 DT.

Une variante à cette approche consiste à comparer l'échantillon d'air à des concentrations connues d'un composé de référence, comme le butanol. Avec cette méthode, on exprime l'intensité d'une odeur en concentration équivalente de butanol. L'échelle varie normalement de 0 à 80 ppmv de butanol (la concentration la plus élevée à laquelle le nez peut réagir). La plupart des odeurs ambiantes correspondent à moins de 60 ppmv de butanol.

Les chercheurs ont utilisé ces techniques pour évaluer l'odeur dégagée par divers types d'exploitations agricoles. L'odeur dégagée par les porcheries est, en général, classée comme « forte » ou « très forte », alors que celle des poulaillers et des étables est normalement classée comme « forte », c'est-à-dire comparable à celle des usines de papier, des usines pétrochimiques et des raffineries de pétrole. Bien entendu, l'intensité de l'odeur varie considérablement selon la vitesse du vent, la stabilité de l'air, l'humidité et l'éloignement par rapport à la source.

Les exploitants agricoles peuvent réduire l'intensité des odeurs de ferme de plusieurs manières, la plus évidente, peut-être, étant la planification de la disposition des bâtiments : il s'agit de

placer les sources d'odeur, comme les étables et les cuves à déjection, sous le vent et à l'écart des habitations. Parmi les autres méthodes, on compte le nettoyage et le lavage fréquents des étables, l'aération du fumier entreposé (ce qui peut favoriser l'émission de NH_3), l'application du lisier par injection et l'incorporation du fumier solide dans le sol immédiatement après l'épandage. Enfin, on a proposé d'utiliser divers produits chimiques et diverses cultures bactériennes pour détruire les odeurs, mais leur coût est souvent élevé et leur efficacité limitée. Une approche possible consiste à ajouter de la bentonite (une argile très absorbante) à l'alimentation des animaux. Cet additif augmentait le gain de poids dans certaines conditions.

Oxydes d'azote

En présence de rayonnement solaire, les oxydes d'azote réagissent avec les composés organiques volatils (COV) pour produire de l'ozone, le principal constituant du smog. Les oxydes d'azote sont surtout produits par combustion des combustibles fossiles et proviennent en général des automobiles et de sources industrielles. La machinerie agricole utilise elle aussi beaucoup de combustible; au Canada, par exemple, 25 % des véhicules lourds alimentés au carburant diesel sont utilisés en agriculture. On ne connaît pas l'importance de la machinerie agricole en tant que source d'oxydes d'azote, mais sa contribution au smog est probablement négligeable. Malgré cela, des mesures de conservation de l'énergie, comme la diminution des opérations de labourage, peuvent réduire quelque peu les émissions d'oxydes d'azote.

Tout comme le N_2O, l'oxyde nitrique (NO) est quelquefois produit dans le sol par nitrification et dénitrification. Dans certaines zones rurales, cette source de NO peut être aussi importante que les émissions d'oxydes d'azote par des sources industrielles. On peut probablement réduire les émissions de NO par les sols agricoles, en utilisant des méthodes semblables à celles décrites pour le N_2O.

Aérosols

Constitués de particules solides en suspension dans l'atmosphère, les aérosols sont formés dans l'air par des réactions entre les gaz ou injectés dans l'air par des processus se déroulant au niveau du sol. Ils sont constitués de diverses matières et possèdent une taille variant de moins de 1 micromètre (µm, un millième de millimètre) à la taille d'un grain de sable. Les aérosols sont principalement le résultat de phénomènes naturels comme les éruptions volcaniques, les embruns marins, les feux de forêt et l'érosion du sol. Toutefois, certains aérosols sont aussi produits par des activités anthropiques, comme l'utilisation de combustibles fossiles.

Les particules de taille inférieure à 2,5 µm représentent un grave problème de visibilité et de santé humaine. Les aérosols absorbent et reflètent la lumière, produisant la brume sèche observée dans les villes. Ils peuvent aussi être inhalés et piégés dans les voies respiratoires où ils provoquent des maladies respiratoires et même le cancer.

Les aérosols ont aussi un impact important sur le climat planétaire. Ils constituent les noyaux ou les « germes » qui favorisent la formation de nuages. Ils réfléchissent aussi le rayonnement solaire, refroidissant ainsi la terre. Dans certaines régions, le refroidissement causé par les aérosols est du même ordre de grandeur que le réchauffement occasionné par le CO_2. Toutefois, ce refroidissement, estime-t-on, n'arrivera pas à compenser le réchauffement futur résultant de l'accroissement de la teneur en CO_2.

Les quantités d'aérosols produites par l'agriculture au Canada n'ont pas été mesurées régulièrement, mais elles sont probablement faibles. Néanmoins, les exploitations agricoles émettent certaines

quantités d'aérosols, qui sont de deux types : les particules primaires qui sont libérées telles quelles dans l'air (p. ex., poussières provenant des champs, suie et cristaux de pesticides), et les particules secondaires formées dans l'air à partir de gaz émis par les activités agricoles (p. ex., particules de NH_4^+ formées à partir de NH_3). On a déjà décrit certaines particules secondaires; nous nous intéresserons ici surtout aux particules primaires.

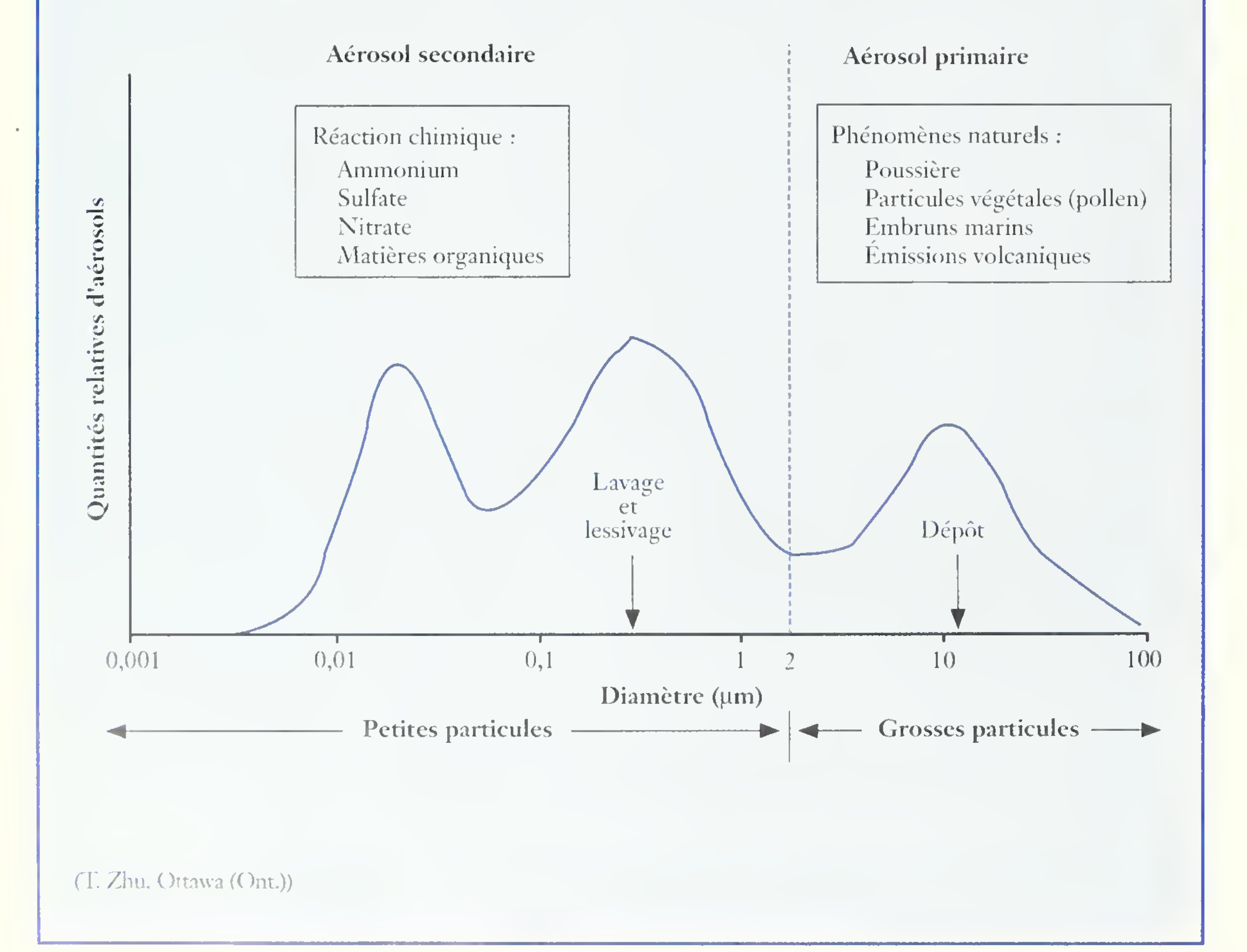
L'aérosol le plus courant produit par les activités agricoles est probablement la poussière provenant de l'érosion des sols. Lorsque le sol est sec, meuble et dépourvu d'une couverture végétale, le vent peut entraîner les particules de surface et les transporter sur de grandes distances. Ce problème a été le plus gravement ressenti dans le sud des Prairies au cours des « difficiles » années 1930, lorsqu'une couche de sol pouvant atteindre une épaisseur de plusieurs centimètres a été perdue, a obscurci le ciel, puis s'est déposée partout sous forme de poussière. Les mesures de conservation qui sont prises permettent maintenant de prévenir les tempêtes de poussière à une si grande échelle, mais il y a toujours à l'occasion des épisodes d'érosion à l'échelle locale.

L'érosion se déroule en deux étapes. D'abord, le vent détache de petits grains du sol (0,1 à 0,5 mm) qui agissent ensuite comme un abrasif sur des particules de sol plus grosses. Les particules détachées se déplacent de trois façons : par saltation, par glissement et par mise en suspension. Lors du déplacement par saltation, les particules rebondissent à la surface; lors du glissement du sol, les grosses particules (0,5 à 1,0 mm) roulent et glissent après avoir été heurtées et mises en mouvement par les particules qui « rebondissent ». Ce sont ces deux procédés qui sont surtout responsables de l'érosion. Toutefois, dans le cas des sols de texture fine comportant de nombreuses particules de taille inférieure à 0,1 mm, le sol peut être soulevé bien au-dessus de la surface (mis en suspension), ce qui produit des nuages de poussières pouvant être transportés sur des centaines de kilomètres. Les particules en suspension finissent par retomber lorsque le vent se calme ou lorsqu'elles sont entraînées par la pluie.

Après la mauvaise expérience des années 1930, les chercheurs ont mis au point de nombreuses techniques de réduction de l'érosion dont certaines sont maintenant couramment utilisées : réduction des opérations de labourage, conservation des résidus sur la surface du sol, plantation de brise-vent et mises en jachère moins fréquentes. En conséquence, moins de 5 % des terres cultivées risquent de subir une grave érosion, même si environ la moitié des sols agricoles canadiens possèdent,

Distribution des tailles des aérosols et réchauffement planétaire

La distribution des tailles d'un aérosol dépend étroitement de son origine. Les grosses particules sont principalement produites par des processus mécaniques, comme le vent, alors que les particules fines sont produites par des réactions chimiques. La distribution des tailles et la composition chimique des aérosols sont des facteurs importants qui déterminent le changement climatique à l'échelle planétaire et la visibilité. Les aérosols ont un effet de refroidissement qui compense en partie l'effet de réchauffement des gaz à effet de serre.



(T. Zhu, Ottawa (Ont.))

lorsqu'ils sont dépourvus d'une couverture végétale, une sensibilité à l'érosion éolienne allant de modérée à élevée.

Les épisodes d'érosion grave et à grande échelle ont en grande partie été éliminés, mais de la poussière provenant de terres agricoles continue d'être injectée dans l'air lors d'épisodes localisés d'érosion, pendant le labourage ou lors d'autres opérations agricoles. La poussière provenant des sols n'est pas uniquement constituée de particules minérales inertes. Elle peut aussi contenir des graines, du pollen, des tissus végétaux, ainsi que des composés agrochimiques, dont des pesticides. Ces matières peuvent causer des problèmes de santé et, dans le cas des pesticides, contaminer d'autres environnements.

La fumée produite par le brûlage des mauvaises herbes et de la paille constitue un autre aérosol d'origine agricole. Cette fumée contient de la suie (particules de carbone) qui peut provoquer des problèmes respiratoires. Le brûlage des excédents de paille était, jusqu'à récemment, une pratique courante dans les zones de rendement élevé, comme dans le sud du Manitoba. Les règlements provinciaux et municipaux ont maintenant presque complètement éliminé cette pratique. Une partie de l'excédent de paille a maintenant trouvé des applications industrielles, comme le « carton-paille », ce qui élimine les risques pour la santé et procure aussi un revenu supplémentaire.

Érosion du sol dans le sud de l'Alberta, en 1935



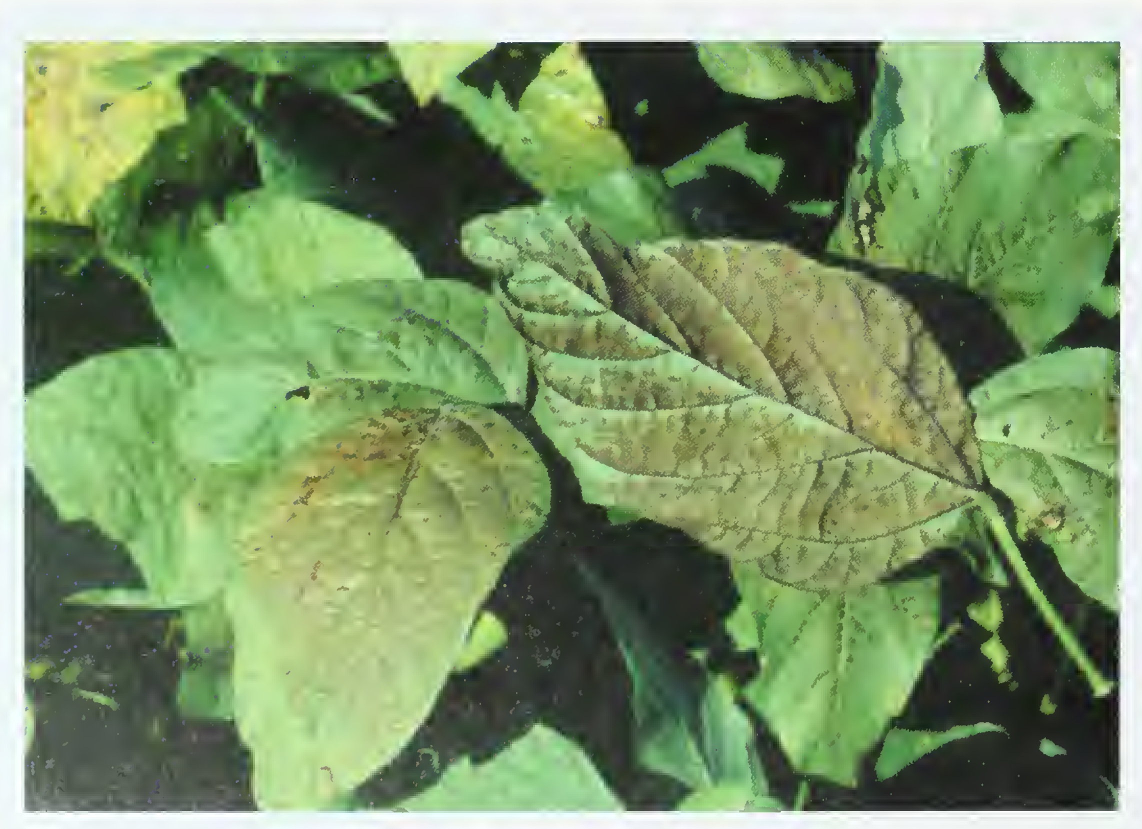
Rayonnement ultraviolet

Contexte

Le soleil émet un rayonnement sur une gamme étendue de longueurs d'onde. Comme certaines de ces longueurs d'onde stimulent les récepteurs de l'oeil, nous pouvons les « voir ». Ainsi, le rayonnement de longueurs d'onde comprises entre environ 390 nm (10^{-9} m) et environ 760 nm constitue ce qu'on appelle la « lumière visible ». Dans cette gamme, les différentes longueurs d'onde correspondent à différentes couleurs : les plus courtes correspondent au violet et les plus longues au rouge. Toutefois, le soleil produit aussi un rayonnement possédant une longueur d'onde située hors du domaine visible. Le rayonnement de longueur d'onde plus longue que le rouge est appelé rayonnement infrarouge, tandis que celui de longueur d'onde plus courte que le violet est appelé rayonnement ultraviolet.

L'énergie du rayonnement augmente au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue. Le rayonnement ultraviolet transporte donc beaucoup plus d'énergie que le rayonnement visible, et cette énergie est suffisante pour provoquer de graves lésions aux organismes vivants. Toutefois, seule une petite partie du rayonnement UV émis par le soleil atteint la surface de la Terre, la plus grande partie étant absorbée par la couche d'ozone située dans la haute atmosphère (stratosphère). Il y a filtration du rayonnement UV même si la concentration d'ozone est très faible. Si tout l'ozone était concentré en une couche à la surface de la Terre, cette couche aurait une épaisseur de 3 mm seulement. À cause de son effet protecteur, l'ozone de la haute atmosphère (contrairement à l'ozone troposphérique) est indispensable au maintien de la vie.

Comme l'ozone possède une fonction vitale, l'appauvrissement de la couche de O_3 dans la haute atmosphère, observé par les chercheurs depuis quelques décennies, est un phénomène alarmant : la couche d'ozone « s'amincit ». À l'échelle planétaire, la quantité d'ozone a déjà diminué en moyenne de 3 %. Toutefois, cette diminution a surtout été observée près des pôles. La valeur moyenne pour le Canada a diminué d'environ 6 % depuis 1980. Près du continent antarctique, cette diminution a parfois atteint 60 %, formant ce qu'on a appelé le « trou d'ozone de l'Antarctique ».



Feuilles de soja endommagées par les rayonnement UV-B.

(M. Morrison, AAC)

Les chercheurs pensent maintenant que l'amincissement de la couche d'ozone est le résultat de l'émission de divers gaz produits par des activités industrielles, dont les plus connus sont les chlorofluorocarbures (CFC) utilisés en réfrigération et comme propulseur dans les bombes aérosols. Ces molécules, qui ont une durée de vie très longue, migrent jusque dans la haute atmosphère où elles provoquent la décomposition du O_3 en O_2. Le bromure de méthyle, utilisé à travers le monde comme fumigant pour tuer les insectes et les nématodes sur les terres agricoles, dans les serres et dans les installations d'entreposage et de transformation de produits alimentaires, est un autre gaz qui, on le sait, provoque la décomposition du O_3. La perte d'ozone provoquée par le bromure de méthyle pourrait représenter jusqu'à 10 % des pertes totales. Enfin, l'oxyde nitrique (NO) peut accélérer la décomposition de l'ozone. Ce gaz est produit naturellement dans l'atmosphère à partir du N_2O. Un accroissement des émissions de N_2O peut donc indirectement provoquer la décomposition du O_3.

Après avoir identifié les causes de l'amincissement de la couche d'ozone, la communauté internationale en est venue à un accord (Le Protocole de Montréal sur les substances appauvrissant la couche d'ozone) visant à réduire les émissions de gaz comme les CFC et le bromure de méthyle. Tous les pays développés ont convenu de ne plus utiliser des CFC à compter de l'an 2000 et de cesser d'utiliser le bromure de méthyle d'ici 2015. Le Canada s'est

engagé à cesser d'utiliser le bromure de méthyle d'ici 2001 (avec certaines exceptions pour les cas où il n'existe pas de solution de rechange). Déjà en 1995, les quantités de bromure de méthyle utilisées étaient inférieures d'environ 40 % à celles utilisées en 1990. Parmi les produits de remplacement du bromure de méthyle qui sont prometteurs, on compte d'autres produits chimiques, la terre à diatomées (qui endommage physiquement les insectes) et les stratégies de lutte intégrée contre les parasites.

En adoptant des mesures de contrôle strictes visant l'utilisation des CFC et d'autres substances appauvrissant la couche d'ozone, on pourra probablement arrêter l'amincissement continu de la couche d'ozone aux environs de l'an 2000. Toutefois, à cause de la longue durée de vie des CFC présents actuellement dans l'atmosphère, il faudra peut-être attendre jusqu'à 2060 avant de voir les concentrations d'ozone retourner aux valeurs d'avant 1980. En conséquence, on peut s'attendre à ce que l'intensité du rayonnement UV soit élevée pendant encore plusieurs décennies; il y aurait donc lieu de tenir compte des effets de ce rayonnement sur la production agricole.

Effet du rayonnement ultraviolet sur les cultures

Puisqu'une partie du rayonnement UV atteint la surface de la terre, les plantes terrestres se sont dotées de mécanismes de protection. Certaines produisent des pigments, semblables à un écran solaire, qui absorbent le rayonnement UV. D'autres, comme le soja, possèdent dans de fins poils disposés sur la surface supérieure de leurs feuilles des pigments qui absorbent le rayonnement UV (les symptômes d'une exposition au rayonnement UV sont donc souvent plus graves sur la surface inférieure des feuilles). De plus, la plupart des plantes peuvent, dans une certaine mesure, réparer les cellules et l'ADN endommagés par une exposition excessive au rayonnement UV.

Malgré ces mécanismes de défense, l'exposition à un rayonnement UV très intense peut endommager la membrane des cellules et l'ADN à l'intérieur des cellules. L'effet le plus dommageable se manifeste peut-être dans les chloroplastes (les organes de photosynthèse qui contiennent de la chlorophylle). Il y a alors réduction de la photosynthèse, ce qui entraîne une diminution de la croissance de la plante.

Dans de nombreuses études récentes réalisées en utilisant une combinaison de filtres UV et de lampes UV, on a évalué les effets d'un accroissement de l'intensité UV sur la croissance des plantes. La plupart des recherches visaient l'UV-B, la bande des longueurs d'onde comprises entre 290 et 315 nm. Le rayonnement ultraviolet de longueur d'onde plus longue (UV-A) est moins énergétique et, donc, moins dommageable. Le rayonnement de longueur d'onde plus courte (UV-C) est absorbé si efficacement par l'atmosphère qu'il n'atteint jamais la surface terrestre.

Les chercheurs ont observé les effets du rayonnement UV-B sur la croissance ou le rendement de nombreuses cultures,

Tableau 18 Sensibilité des cultures canadiennes au rayonnement UV-B

Tolérantes	Intermédiaires	Sensibles
Blé	Orge	Avoine
Tournesol	Seigle	Poivron
Maïs	Soja	Concombre
Tabac	Pois	Moutarde
Trèfle rouge	Tomate	Canola
Luzerne	Pomme de terre	
Pâturin glauque	Fruits fragiles	
Dactyle pelotonné		
Chou		

(M. Morrison, AAC)

comprenant le soja, les tomates et le canola. Les effets de l'UV-B sur le rendement ne sont pas toujours les mêmes, la production de certaines espèces étant plus élevée en présence d'UV-B. Des études réalisées sur certaines espèces (p. ex., le maïs) n'ont fait état d'aucun dommage, même à des niveaux élevés d'UV-B. De plus, comme on a pu l'observer pour le canola et le soja, pour une même culture la réponse aux UV-B varie selon la variété. Par exemple, lors d'une étude portant sur huit variétés de soja, on a constaté que six avaient un rendement plus faible lorsqu'elles étaient exposées à des UV-B intenses, alors que les deux autres accusaient un rendement accru. En conséquence, même si de nombreuses données indiquent qu'un accroissement de l'intensité du rayonnement UV-B peut entraîner une baisse de rendement, il y a beaucoup de facteurs qui viennent compliquer les résultats de ces études.

Afin d'évaluer les effets potentiels d'un accroissement de l'intensité du rayonnement UV sur l'agriculture, les chercheurs ont mesuré la réaction de 100 variétés de 12 cultures exposées à un rayonnement UV plus intense correspondant à un amincissement de 20 % de la couche d'ozone. Parmi ces 100 variétés, 40 n'ont pas été touchées. On a décrit la sensibilité des cultures aux UV-B à l'aide d'un modèle simple basé sur ces résultats et sur d'autres données (tableau 18). Le rendement des cultures « tolérantes » était peu modifié par un accroissement de l'intensité du rayonnement UV-B, pouvant atteindre 20 % des niveaux de 1980. Les cultures de sensibilité « intermédiaire » pouvaient accuser une baisse de rendement de 1, 2,5 et 5 % lorsque l'intensité du rayonnement UV-B était augmentée de 5, 10 et 20 % respectivement, alors que les cultures « susceptibles » pouvaient voir leurs rendements réduits de 2, 5 et 10 % dans les mêmes conditions. Ces chiffres permettent de prévoir les pertes économiques potentielles découlant d'un accroissement de l'intensité des UV-B. Par exemple, un accroissement de 5 % de l'intensité du rayonnement UV entraînerait une perte de rendement correspondant à environ 90 millions de dollars par année, tandis qu'un accroissement de 20 % entraînerait une perte d'environ 400 millions de dollars.

Le rayonnement ultraviolet peut aussi influer sur la qualité des cultures. L'exposition au rayonnement UV peut produire des taches à la surface des fruits et des légumes ou modifier leur goût en augmentant la production de pigments. Par exemple, on a constaté lors d'une étude que des brocolis exposés au rayonnement UV-B contenaient une plus grande quantité de pigments absorbant le rayonnement UV-B. Tous ces effets peuvent diminuer la valeur de la culture.

Le rayonnement ultraviolet peut aussi avoir des effets écologiques sur certaines communautés végétales. Exposées à un rayonnement UV-B intense, les espèces plus tolérantes peuvent se développer au détriment des espèces plus susceptibles. Cet effet pourrait être important dans les prairies de composition mixte ou encore modifier la compétition entre les mauvaises herbes et les cultures. De plus, un accroissement du rayonnement UV-B peut affecter la production de graines, car les parties reproductrices exposées peuvent être particulièrement vulnérables.

En plus de provoquer des effets sur le rendement, sur la qualité et sur l'écologie des cultures, l'accroissement du rayonnement UV-B pourrait aussi avoir d'autres conséquences. Il pourrait, par exemple, influer sur la santé des animaux, les maladies des plantes, les parasites et l'efficacité des pesticides. Ces effets n'ont pas encore fait l'objet d'études.

Les recherches sur les manières de réduire les effets du rayonnement UV-B sur les cultures ont peu progressé jusqu'à présent. Toutefois, étant donné la réaction différente chez les espèces et les variétés de plantes, il est peut-être possible de limiter les pertes

économiques en sélectionnant des variétés de plantes tolérantes au rayonnement UV-B.

Pesticides

Au Canada, la plupart des exploitants agricoles utilisent des pesticides pour lutter contre les mauvaises herbes, les insectes et les maladies. Bon nombre de ces pesticides sont, du moins dans une certaine mesure, toxiques pour les êtres humains ou peuvent être nuisibles pour l'environnement. Les pesticides appliqués sur le sol ou sur les cultures peuvent être entraînés par le vent lors de l'application ou se volatiliser ultérieurement. Une fois dans l'air, les pesticides peuvent être transportés par le vent sur de grandes distances avant d'être déposés sur le sol ou dans l'eau. Par exemple, les pesticides déposés dans les Grands lacs ont suscité de l'inquiétude quant à la qualité de l'eau.

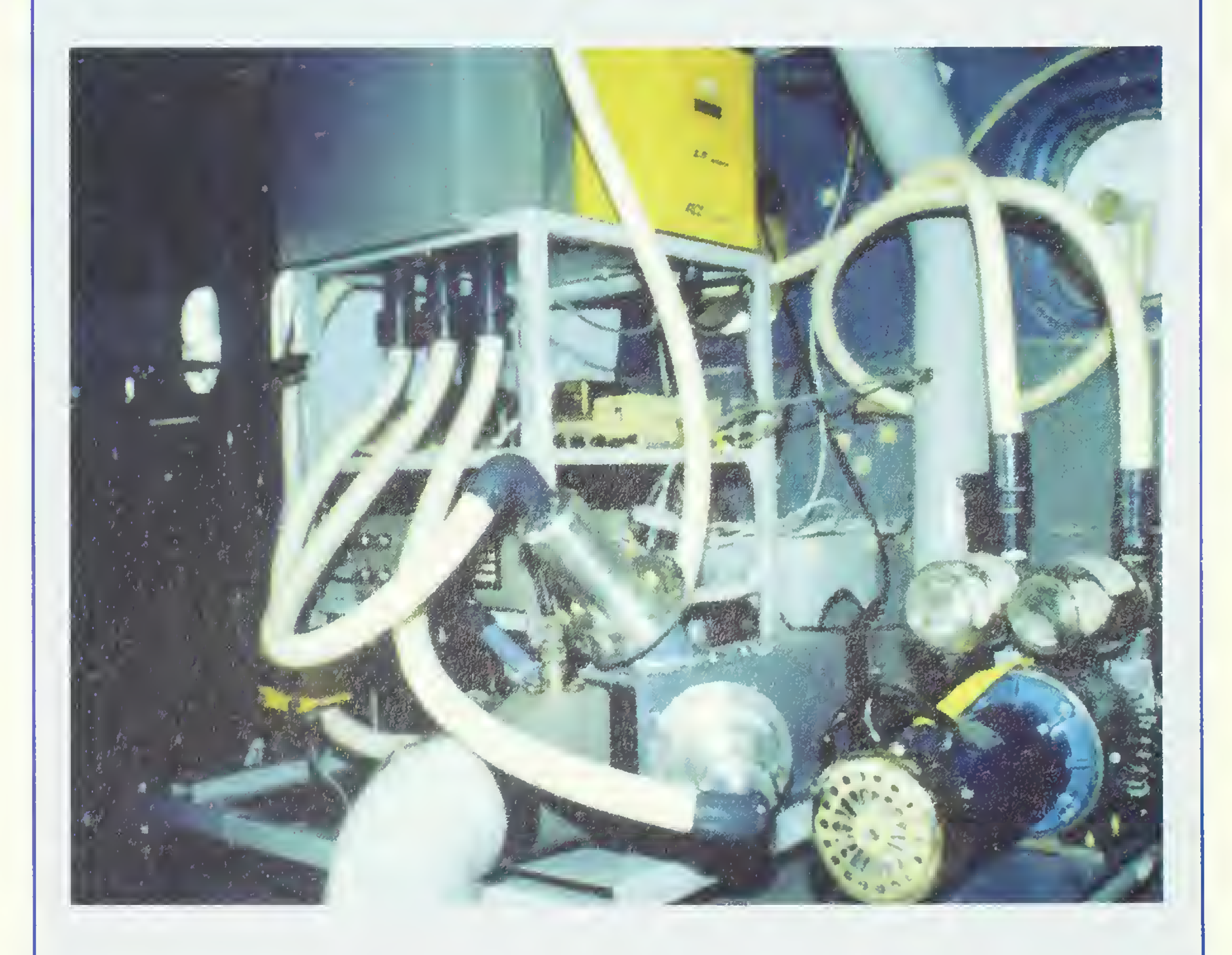
Certaines inquiétudes que suscitaient les pesticides ne sont plus aussi valables aujourd'hui, car d'anciens pesticides persistants (comme le DDT) ne sont plus utilisés au Canada. Maintenant, les exploitants agricoles utilisent normalement de nouvelles préparations conçues pour lutter spécifiquement contre certains parasites et pour être facilement dégradées par les microbes du sol. De plus, les pesticides sont appliqués de nos jours à des taux beaucoup plus faibles, normalement de l'ordre de quelques grammes par hectare, et non aux taux élevés de l'ordre de quelques kilogrammes par hectare comme dans le passé.

Cependant, malgré les améliorations apportées aux pesticides actuellement utilisés, il pourrait être utile de prendre des précautions supplémentaires pour réduire leurs pertes dans l'atmosphère. Par exemple, on peut réduire le risque d'entraînement par le vent en pulvérisant les pesticides seulement par temps calme et en s'assurant que les gouttelettes sont assez grosses pour ne pas rester en suspension dans l'air. Dans certains cas, il peut être possible de réduire le taux ou la fréquence d'application en utilisant d'autres méthodes de lutte. Par exemple, des méthodes biologiques permettent maintenant de lutter contre certaines mauvaises herbes et certains insectes. La meilleure façon de réduire l'utilisation de pesticides consisterait peut-être à employer des méthodes de « lutte intégrée » faisant appel à une combinaison optimale de méthodes chimiques, biologiques et culturales.

Les pesticides permettent d'obtenir des rendements plus élevés sur les terres agricoles au Canada. Cependant, étant donné leurs effets possibles sur la santé humaine et sur l'environnement, les exploitants agricoles doivent s'assurer que les pesticides restent sur le site visé.

Produits agrochimiques

Les produits agrochimiques, comme les insecticides et les herbicides, peuvent être rejetés dans l'environnement par dérive, par volatilisation ou avec le ruissellement. Par exemple, certains produits agrochimiques se sont retrouvés dans les Grands lacs. Les chercheurs utilisent un échantillonneur à grand volume monté à bord d'un aéronef pour mesurer les flux de produits agrochimiques à l'échelle régionale.



(G. St-Amour, AAC)

5. Conclusions

Les cultures, les animaux et les sols qui constituent nos exploitations agricoles baignent dans l'air. Ils émettent des gaz et des particules qui modifient la composition de l'atmosphère localement et au loin. Simultanément, ils absorbent de l'air vicié par l'industrie et par d'autres activités humaines, et ils en subissent les effets. Les exploitations agricoles constituent donc des indicateurs sensibles de la santé de l'air que nous respirons.

Situation actuelle

Au cours des dernières années, l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a été une importante source d'inquiétude. Nous savons maintenant que 10 % des émissions de gaz à effet de serre au Canada proviennent des exploitations agricoles (13 % en comptant les émissions indirectes de CO_2). Environ deux tiers de ces émissions sont sous forme de N_2O et un tiers sous forme de CH_4. Les animaux et le fumier produisent environ 58 % de ces émissions, tandis que les méthodes culturales en produisent 37 %. À une certaine époque, l'agriculture constituait aussi une source importante de CO_2; ces émissions, dont la plus grande partie provenait des sols cultivés, sont devenues presque négligeables. Ces estimations comportent encore une certaine incertitude, particulièrement en ce qui concerne le N_2O dont les émissions soudaines et sporadiques rendent toute estimation difficile.

Les activités agricoles entraînent aussi le rejet d'autres matières dans l'atmosphère. Elles constituent la principale source d'ammoniac atmosphérique et peuvent aussi entraîner le rejet dans l'air, mais en quantités normalement faibles, de certains oxydes d'azote, de poussière et de pesticides.

Les exploitations agricoles rejettent certains gaz qui modifient la composition de l'atmosphère, mais ces émissions sont, à leur tour, modifiées par des émissions provenant d'autres secteurs d'activité de notre société. Les dommages aux cultures par l'ozone troposphérique dans les zones fortement peuplées en sont un exemple. Cet O_3 influe sur le rendement et la qualité des produits agricoles des exploitations environnantes, qui, du fait d'être à proximité des zones peuplées, cultivent souvent des plantes de grande valeur. Les effets potentiels d'un accroissement de l'intensité du rayonnement UV-B provoqué par l'appauvrissement de l'ozone de la haute atmosphère par des produits chimiques industriels, comme les CFC, en sont un autre exemple. On ne connaît pas encore précisément les effets d'un accroissement des UV-B sur les cultures et sur la santé des animaux. Toutefois, il pourrait y avoir certains dommages, surtout si, comme on le prévoit, l'intensité du rayonnement UV-B continue de croître.

Possibilités de réduction des émissions

L'émission nette de gaz —N_2O, CO_2, CH_4 et NH_3—est normalement un symptôme d'une utilisation incomplète des apports. L'émission de quantités excessives de CH_4 par les animaux correspond à un gaspillage de nourriture; l'émission de N_2O ou de NH_3 traduit l'utilisation inefficace de l'azote contenu dans les fertilisants, les résidus de cultures ou le fumier; et une émission excessive de CO_2 reflète une utilisation inefficace de l'énergie solaire, emmagasinée sous forme de combustible fossile ou de carbone végétal. Les exploitants agricoles peuvent réduire ces émissions en gérant plus efficacement le cycle de l'azote et le cycle du carbone, afin de prévenir l'émission de gaz dans l'environnement. En raison de leur efficacité accrue, de nombreuses techniques visant à réduire les émissions

Efficacité accrue

La compétitivité des marchés entraîne une production plus rentable. Les pénuries et les coûts de l'énergie rendent les producteurs plus conscients de la valeur de l'énergie. De même, devant la possibilité d'un changement climatique à l'échelle planétaire, les producteurs pourraient être en mesure d'utiliser plus efficacement les ressources et ainsi d'accroître la quantité d'aliment produite par unité de gaz à effet de serre émise.

Exemples de productivité accrue en Ontario

Cultures	1975	1991
Équivalent en diesel		
du soja produit (L/t)	174	95
du maïs produit (t/ha)	3,4	6,9

Secteur laitier	1951	1991
Animaux (million)	1,7	0,9
Lait (milliard de L)	2,4	2,5
Surface nécessaire à la production de nourriture (million de ha)	1,1	0,5
Fumier produit (million de t)	21,4	12,5

Oeufs	1951	1991
Oeufs produits (million de douzaines)	107	179
Surface nécessaire à la production de nourriture (millier de ha)	129	61
Fumier produit (kg/douzaine d'oeufs)	7.1	3.4

Poulets	1951	1991
Viande produite (million de kg)	45	299
Surface nécessaire à la production de nourriture (millier de ha)	96	117
Fumier produit (kg/kg de viande)	12.6	3.9

Ces tableaux montrent que la productivité s'est considérablement accrue au cours des périodes sélectionnées. L'énergie consommée pour produire un kilogramme de soja a diminué de moitié en 15 ans, et la quantité de fumier produite par unité de lait, d'oeuf ou de poulet a diminué de moitié en 40 ans. On peut donc s'attendre à ce que les quantités de CO_2 provenant des combustibles fossiles, et les quantités de N_2O, provenant du fumier, émises par unité de production aient, elles aussi, diminué.

ont aussi d'autres effets bénéfiques comme la réduction des coûts de production, la conservation des sols et de l'eau et une meilleure santé des écosystèmes.

L'agriculture produira toujours certains gaz, soit du CH_4, du N_2O et du NH_3. Même les écosystèmes qui ont été remplacés par des exploitations agricoles en produisaient. Toutefois, une utilisation plus efficace de l'azote et du carbone peut réduire au minimum les quantités émises. Des réductions pouvant atteindre 20 à 30 % pourraient être possibles. L'amélioration des techniques agricoles peut, en fait, entraîner une réduction nette du CO_2 atmosphérique, en emmagasinant du carbone dans les sols. Cet accroissement de la quantité de C emmagasiné dans les sols pourrait aider le Canada à atteindre ses objectifs en matière de réduction de ce gaz à effet de serre.

Défis futurs

Une part importante du présent document portait sur les techniques agricoles actuelles, plus particulièrement sur la façon dont elles influent sur la qualité de l'air que nous respirons et, partant, sur l'effet qu'ont sur elles les changements atmosphériques. Nous avons résumé les estimations et les procédés qui décrivent les agrosystèmes actuels. Nous savons toutefois que les sytèmes agricoles sont en perpétuelle évolution et que bon nombre des systèmes que nous avons cherché à comprendre dans ce document seront peut-être désuets dans quelques années seulement. Il est donc important d'au moins indiquer certains changements imminents et de tenter d'évaluer leurs effets possibles.

La recherche continue d'une meilleure productivité agricole est un facteur important. La demande pour des produits agricoles augmente au fur et à mesure de la croissance de la population planétaire. De plus, la survie économique des exploitations agricoles dépend

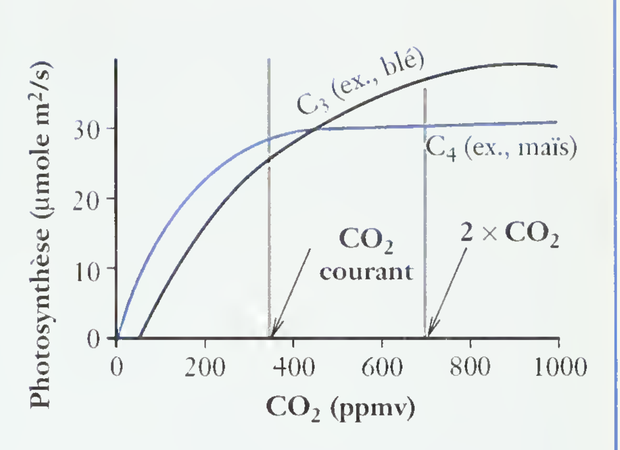
souvent d'une production toujours plus importante. Les gains de productivité peuvent avoir certains avantages : ils peuvent, par exemple, contribuer à augmenter la teneur en C du sol en produisant plus de résidus de plantes. Cependant, les objectifs de rendement plus élevés peuvent, en même temps, exiger l'utilisation d'une plus quantité de fertilisants ou d'autres matières, ce qui pourrait entraîner l'émission d'une plus grande quantité de gaz à effet de serre.

Les facteurs économiques constituent un autre point dont il faut tenir compte. Afin de maintenir leur profitabilité, les exploitants agricoles modifient leurs systèmes en fonction du coût des intrants et du prix des produits. Les surfaces consacrées à certaines cultures changent donc d'une année à l'autre, ce qui modifie les émissions de gaz à effet de serre et d'autres émissions. Le récent virage vers des systèmes basés sur les animaux est peut-être le changement le plus frappant. Ce changement peut avoir de graves conséquences. D'une part, un nombre plus élevé d'animaux exige l'affectation d'une surface plus grande à la production de fourrage, ce qui entraîne une réduction du CO_2 atmosphérique en emmagasinant une plus grande quantité de C dans les sols. Cependant, un nombre plus élevé d'animaux peut, en même temps, entraîner des émissions plus importantes de CH_4, de N_2O et de NH_3. Si la tendance vers un nombre accru d'animaux de ferme se maintient, il faudra réviser bon nombre de nos estimations actuelles et peut-être mettre en oeuvre de nouvelles mesures de réduction des émissions.

Les systèmes agricoles ne seront pas les seuls à changer. Les conditions environnementales qui affectent l'agriculture changeront elles aussi au cours des prochaines décennies. Nombreux sont les chercheurs qui pensent que l'effet de serre provoquera des variations climatiques notables au cours des prochaines décennies; même de petites variations de température ou de précipitation influeraient sur les

« Effet fertilisant » du dioxyde de carbone

Une concentration élevée de CO_2 peut améliorer le rendement des cultures en augmentant la photosynthèse et en permettant une utilisation plus efficace de l'eau. Cette « fertilisation » par le CO_2 est plus marquée chez les plantes de type C_3 (par exemple le blé, le soja et la plupart des graminées) que chez les plantes de type C_4 (par exemple le maïs et certaines graminées). Certains chercheurs pensent que la fertilisation par le CO_2 peut largement compenser les pertes de rendement provoquées par les changements climatiques. Selon d'autres, ces avantages sont peut-être surévalués, car l'interaction entre la concentration accrue de CO_2 et d'autres facteurs environnementaux n'est pas prise en considération. Il y aurait lieu d'effectuer d'autres recherches sur cette question.



Agriculture biologique—une approche différente

L'agriculture biologique réduit au minimum le besoin d'agents extérieurs. Elle utilise des systèmes qui évitent ou excluent dans une large part l'utilisation de fertilisants synthétiques, de pesticides, de régulateurs de croissance et d'additifs pour l'alimentation des animaux. Beaucoup pensent que les systèmes biologiques produisent moins d'émissions de gaz à effet de serre que les systèmes agricoles classiques.

L'agriculture biologique tente d'être en harmonie avec la nature. Elle compte sur des ressources renouvelables et sur une utilisation moindre de l'énergie fossile. Le point de vue holistique des agriculteurs biologiques suit une approche naturelle à l'agriculture. Pour pouvoir vivre de la terre, chaque agriculteur prend tous les jours des décisions basées sur des considérations économiques et écologiques. Avec le temps, les agroécosystèmes atteignent un état dans lequel les processus du vivant et du non-vivant sont en équilibre. Pour beaucoup, il s'agit tout autant d'un style de vie que d'une manière de gagner sa vie.

L'approche par systèmes holistiques exige une connaissance intime des relations entre le sol, l'eau, le climat et la biologie du système agricole. De plus, ces systèmes prennent aussi en compte les effets extérieurs comme l'économie rurale et la sociologie.

En général, les familles exploitant des fermes biologiques ont des traditions d'écologisme et utilisent toutes les ressources de façon mesurée. Les décisions prises jour après jour par les agriculteurs biologiques sont complexes et exigent une connaissance approfondie de nombreux domaines scientifiques. Les agriculteurs biologiques pensent que leur philosophie constitue une approche plus respectueuse de la terre.

Les systèmes classiques et biologiques utilisés en agriculture ont pour but de procurer à la société une alimentation de haute qualité; cependant, certains pensent que l'agriculture biologique favorise l'amélioration de la qualité des ressources naturelles disponibles dans la ferme ainsi que la réduction des risques de dommages environnementaux.

(J. Dormaar, AAC)

exploitations agricoles canadiennes. Une autre importante caractéristique environnementale a déjà changé de façon perceptible : la concentration de CO_2, qui dépasse déjà de quelque 30 % celle d'avant l'ère industrielle, doublera probablement au cours du prochain siècle. Comme le CO_2 constitue la matière première de la photosynthèse, cet accroissement pourrait avoir des effets importants sur le rendement des cultures. Certains prévoient même un accroissement des rendements grâce à un effet de « fertilisation par le CO_2 ». D'autres conditions environnementales, comme la concentration d'ozone troposphérique dans les zones peuplées et l'intensité du rayonnement UV-B, pourraient également changer. Ces changements, dont certains sont difficilement prévisibles, pourraient nous amener à modifier notre manière d'exploiter la terre au cours du prochain siècle. Ces changements modifieront également les émissions d'origine agricole, alimentant ainsi le cycle qui lie les exploitations agricoles et l'atmosphère.

Questions en suspens

Étant donné l'imprévisibilité des changements futurs que subiront les écosystèmes agricoles et les incertitudes relatives à nos estimations actuelles des émissions, il y aurait lieu d'entreprendre d'autres études sur les relations entre les exploitations agricoles et l'atmosphère. Les objectifs ci-après pourraient compter parmi les plus urgents :

- Améliorer encore plus nos estimations des émissions actuelles de gaz, en particulier pour le N_2O. Nous devons disposer de meilleures méthodes permettant d'appliquer les données obtenues localement à des zones plus vastes, et ce, jusqu'à l'échelle nationale.

- Trouver des moyens qui aideront le Canada à respecter ses engagements internationaux en matière de réduction des émissions de gaz potentiellement dangereux.

- Mieux comprendre comment le C, le N et d'autres éléments se déplacent dans les animaux, le sol, l'eau et l'air et sont transférés entre ces divers milieux. Nous saurions alors comment les divers gaz sont liés aux problèmes environnementaux et comment ils réagissent réciproquement. De plus, nous pourrions mieux prévoir de quelle façon les changements dans les techniques agricoles influent sur l'environnement.

- Comprendre de quelle manière les changements atmosphériques affecteront l'agriculture au Canada, et en particulier quels seront les effets des changements climatiques (température et précipitation), d'une concentration accrue de CO_2, d'un rayonnement UV-B plus intense et d'une concentration accrue d'ozone troposphérique. Nous devons connaître l'influence de ces effets sur les rendements, les types de cultures, la productivité animale, les insectes nuisibles et les coûts de production. Nous devons aussi comprendre comment ces changements modifieront les futures émissions atmosphériques d'origine agricole.

6. Bibliographie et ouvrages recommandés

Acton, D.F. and L.F. Gregorich (eds.). 1995. The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources, Agriculture and Agri-Food Canada. Publication 1906/E, 138 pp.

Baht, M.C., B.C. English, A.F. Turhollow, and H.O. Nyangito. 1994. Energy in synthetic fertilizers and pesticides: revisited. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. Report ORNL/Sub/90-99732/2.

Canadian Council of Ministers of the Environment. 1997. Ground-level ozone and its precursors, 1980–1993. Report of the Data Analysis Working Group, Canadian Council of Ministers of the Environment. 295 pp.

Coxworth, E., M.H. Entz, S. Henry, K.C. Bamford, A. Schoofs, P.D. Ominski, P. Leduc, and G. Burton. 1995. Study of the effect of cropping and tillage systems on the carbon dioxide released by manufactured inputs to western Canadian agriculture: identification of methods to reduce carbon dioxide emissions. Final report for Agriculture and Agri-Food Canada.

Desjardins, R.L. and S.P. Mathur. 1998. Agroecosystem greenhouse gas balance indicator: methane component. Report no. 21 to Agri-environmental indicator project. Agriculture and Agri-Food Canada. 19 pp.

Dumanski, J., L.J. Gregorich, V. Kirkwood, M.A. Cann, J.L.B. Culley, and D.R. Coote. 1994. The status of land management practices on agricultural land in Canada. Centre for Land and Biological Resources, Agriculture and Agri-Food Canada. Technical Bulletin 1994-3E, 46 pp.

Duxbury, J.M. and A.R. Mosier. 1993. Status and issues concerning agricultural emissions of greenhouse gases. Chapter 12 *in* Agricultural dimensions of global climate change, T. Drennen and H.M. Kaiser (eds.); St. Lucie Press, Florida.

ECETOC. 1994. Ammonia emissions to air in Western Europe. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. 194 pp.

Ecological Stratification Working Group. 1995. A national ecological framework for Canada. Centre for Land and Biological Resources, Agriculture and Agri-Food Canada and Ecozone Analysis Branch, State of the Environment Directorate, Environment Canada.

Environment Canada. 1993. A primer on ozone depletion. The environmental citizenship series. Environment Canada. 76 pp.

Gribbin, John and Mary. 1996. The greenhouse effect. The New Scientist 2037, Supplement: Inside Science 92:1–4.

Houghton, John. 1997. Global warming: the complete briefing. Cambridge University Press. 251 pp.

McAllister, T.A., E.K. Okine, G.W. Mathison, and K.-J. Cheng. 1996. Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants. Canadian Journal of Animal Science, 76:231–143.

Monteverde, C.A., R.L. Desjardins, and E. Pattey. 1998. Agroecosystem greenhouse gas balance indicator: nitrous oxide component. Report no. 20 to Agri-environmental indicator project; Agriculture and Agri-Food Canada. 29 pp.

Moss, A.R. 1993. Methane: global warming and production by animals. Chalcome Publications, Kingston, UK. 105 pp.

Policy Branch. Canadian fertilizer consumption, shipments and trade. Annual publications of Policy Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Available on the internet at www.agr.ca

Shoji S. and H. Kanno. 1994. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions. Fertilizer Research 39:147–152.

Smith, W.N., P. Rochette, C. Monreal, R.L. Desjardins, E. Pattey, and A. Jaques. 1997. The rate of carbon change in agricultural soils in Canada at the landscape level. Canadian Journal of Soil Science, 77:219–229.

Stumborg, M.A. (ed.). 1997. Proceeding of the 1997 ethanol research and development workshop. Natural Resources Canada and Agriculture and Agri-Food Canada.

Surgeoner, G.A. 1995. Sustainable agriculture: Heaven on earth? Agri-food Research in Ontario. Special edition, July, 29 pp.

Symbiotics Environmental Research and Consulting. 1996. Inventory of technologies to reduce greenhouse gas emissions from agriculture. Report prepared for Global Air Issues Branch, Environment Canada and Environment Bureau, Agriculture and Agri-Food Canada.

Symbiotics Environmental Research and Consulting. 1997. Agricultural sources, effects and abatement of atmospheric emissions of nitrogen compounds: review of Canadian science and technology. Report prepared for Environment Bureau, Agriculture and Agri-Food Canada.

Tenuta, M., E.G. Beauchamp, and G.W. Thurtell. 1995. Studies of nitrous oxide production and emission from soil: evaluation of N_2O release with different methods and fertilizer sources. Final report to Agriculture and Agri-Food Canada's Trace gas initiative project.

Tollenaar, M. 1996. Corn production, utilisation and environmental assessment—a review. Canada's Green plan, Agriculture and Agri-Food Canada.

Vezina, C. 1997. National ammonia inventory: preliminary emissions. Pollution Data Branch, Environment Canada. (Unpublished draft.)

Wardle, D.I., J.B. Kerr, C.T. McElroy, and D.R. Francis (eds.). 1997. Ozone science: a Canadian perspective on the changing ozone layer. Environment Canada. 119 pp.
See also: http://www.ec.gc.ca/ozone

Working Group 1. Climate change 1995: the science of climate change (Chapter 13: agriculture). Contribution of Working Group 1 to the Second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. World Meteorological Organisation. http://www.ipcc.ch.

Remerciements

L'information présentée dans *La santé de l'air que nous respirons* a été puisée à même les travaux des nombreux scientifiques qui ont contribué à l'initiative de recherche mis sur pied par Agriculture et Agroalimentaire Canada sur les gaz à effet de serre et l'ozone des basses couches de l'atmosphère. On retrouve parmi ces scientifiques, les principaux experts ou chefs d'équipe qui figurent à titre de participants, collaborateurs, collègues, boursiers de recherches post-doctorales, techniciens et étudiants diplômés. Merci à tous.

Participants

Allard, G.; Angers, D.A.; Antoun, H.; Baril, P.; Beauchamp, E.G.; Bordeleau L., Bowen, P.A.; Buckley, D.; Burton, D.; Campbell, C.; Chalifour, F.P.; Chiquette, J.; Cho, C.M.; Coxworth, E.; Desjardins, R.L.; Dow, D., Dunfield, P.; Ellert, B.; Gleig, D.B.; Grace, B.; Grant, B.; Gregorich, E.; Guo, Y.; Izaurralde, R.C.; Jackson, H.A.; Janzen, H.H.; Kaharabata, S.; Kinsman, R.; Knowles, R.; Lapierre, C.; Lin, M.; Liu, J.; MacDonald, B.; MacLeod, J.; MacPherson, J.I.; Massé, D.; Mathison, G.W.; Mathur, S.P.; McAllister, T.; McCaughey, W.P.; McGinn, S.; McKenny, D.J.; Merrill, C.; Monteverde, C.; Morrison, M.J.; Paul, R.J.; Pattey, E.; Patni, N.; Prevost, D.; Renaud, J.P.; Richards, J.; Riznek, R.; Rochette, P.; Runeckles, V.C.; Sabourin, D.; Sauer, F.; Schuepp, P.H.; Selles, F.; Smith, W.; St. Amour, G.; Tarnocai, C.; Thurtell, G.W.; Topp, E.; van Bochove E.; Van Kessel, C.; Wagner-Riddle, C.; Wang, F.; Zhu, T.

À l'Annexe 1, on retrouve, pour ceux qui désirent en savoir plus long, une liste des principaux experts et des projets auxquels ils ont travaillé.

Examinateurs

Les personnes suivantes ont participé à la relecture et ont fait de précieux commentaires : T. Daynard, Ontario Corn Producers; S. Forsyth, Comité national de l'environnement agricole; P. Strankman, Canadian Cattlemen's Association; K. Whittenberg et D. Burton, Université du Manitoba; V. Runeckles, Université de la Colombie-Britannique; J. Farrell, Fertilizer Institute of Canada; E. Beauchamp, Université de Guelph; G. Hamblin, Conseil consultatif canadien de la production biologique; E. Gregorich, K. Beauchemin et C. de Kimpe, Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Équipe de production

Les rédacteurs désirent remercier les personnes suivantes pour leur soutien technique dans la préparation du manuscrit et des figures : S. Rudnitski, J. Sylvestre-Drouin, R. Riznek, C. Merrill et Jacinthe Laferrière d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, ainsi que J.T. Buckley (Gilpen Editing Service).

Gestion de programme

Remerciements à J.M.R. Asselin, L. Bordeleau, G. den Hartog, R.L. Desjardins, B. Grace, H.H. Janzen, C.W. Lindwall, G.A. Neish et A. St-Yves pour leur contribution à la gestion du Programme de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada sur l'ozone et les gaz à effet de serre. Nous aimerions également remercier les responsables du Programme de recherche et de développement énergétiques, administré par Ressources naturelles Canada.

Annexe I

On retrouve ici, pour ceux qui désirent en savoir plus long, une liste des principaux experts et des projets auxquels ils ont travaillé.

Experts et projets

Allard, G. Tél. : 418-656-2131 x 2706 Téléc. : 418-656-7856 C. É. : Guy.allard@plg.ulaval.ca	Dommages faits aux cultures par l'ozone
Angers, D.A. Tél. : 418-657-7980 x 270 Téléc. : 418-648-2402 C.É. : Angersd@em.agr.ca	Effets de la gestion de l'agriculture sur la séquestration du carbone dans l'Est du Canada
Antoun, H. Tél. : 418-656-3650 Téléc. : 418-656-7176 C.É. : Antoun@rsvs.ulaval.ca	Facteurs physiques, chimiques et biologiques du sol qui influencent les émissions de N_2O et de CH_4
Baril, P. Tél : 418-871-1851 Téléc. : 418-871-9625 C.É. : BPRQuebec@groupe-BPR.com	Mise au point d'un plan pour la réduction de l'émission de gaz provenant des animaux
Beauchamp, E.G (voir Thurtell)	Mesure du flux de N_2O provenant des sites agricoles de l'Ontario
Bowen, P.A. Tél. : 604-796-2221 x 225 Téléc. : 604-796-0359 C.É. : Bowenp@em.agr.ca	Effets de l'ozone sur les cultures de grands champs de la Vallée du Fraser
Chalifour, F.P. Tél. : 418-656-2131 x 2306 Téléc. : 418-656-7856 C.É. : Francois-p.chalifour@plg.ulaval.ca	Efficacité de l'azote dans la réduction des émissions de N_2O dans les systèmes de culture céréale–légumineuse

Chiquette, J. Tél. : 819-565-9171 x 249 Téléc. : 819-564-5507 C.É. : Chiquettej@em.agr.ca	Production de gaz à effet de serre par les ruminants : une approche systémique
Cho, C.M. Tél. : 204-474-6045 Télec. : 204-275-8099	Examen de la stabilité, de la persistance et du flux de N_2O en laboratoire et sur le terrain
Coxworth, E. Tél. : 306-343-9281 Téléc. : 306-665-2128	Étude des effets des systèmes de production et des méthodes de labour sur le dioxyde de carbone rejeté par des substances fabriquées épandues lors de l'exploitation agricole dans l'Ouest canadien
Desjardins, R.L. Tél. : 613-759-1522 Téléc. : 613-996-0646 C.É. : Desjardins@em.agr.ca	Mesure de l'imprégnation de l'ozone dans les cultures dans les endroits critiques le long du corridor Windsor–Québec
Ellert, B. Tél. : 403-327-4561 Téléc. : 403-382-3156 C.É. : Ellert@em.agr.ca	Contribution aux émissions de gaz à effet de serre des agroécosystèmes représentatifs des prairies
Izaurralde, R.C. Tél. : 403-492-5104 Téléc. : 403-492-1767 C.É. : Cizzaurra@rr.ualberta.ca	Évaluation quantitative du flux d'oxyde nitreux, de méthane, de dioxyde de carbone dans des écosystèmes gérés et naturels de l'Alberta
Jackson, H.A. (voir Sauer, F.)	Émissions de méthane et de dioxyde de carbone provenant des animaux de ferme et du fumier
Knowles, R. Tél. : 514-398-7890 Téléc. : 514-398-7990	Interactions entre le méthane et le cycle de l'azote dans les systèmes agricoles

Lapierre, C.
Tél. : 418-657-7980 x 269
Téléc. : 418-648-2402
C.É. : Lapierre@em.agr.ca

Effets du chaulage et du travail du sol sur les émissions de N_2O et de CO_2 dans l'Est du Canada

MacDonald, B.
Tél. : 519-826-2086
Téléc. : 519-826-2090
C.É. : Macdonaldb@em.agr.ca

Caractérisation des agroécosystèmes de l'Est ontarien pour leur capacité de produire ou d'emmagasiner des gaz à effet de serre

MacLeod, J.
Tél. : 902-566-6848
Téléc. : 902-566-6821
C.É. : Macleodj@em.agr.ca

Cycle de l'azote dans les systèmes de pommes de terre

Mathison, G.W.
Tél. : 403-492-7666
Téléc. : 403-492-9130
C.É. : Mathison@afns.ualberta.ca

Approche stratégique pour quantifier et réduire la production de CH_4 chez les animaux

McCaughey, W.P.
Tél. : 204-726-7650 x 211
Téléc. : 204-728-3858
C.É. : Pmccaughey@em.agr.ca

Production de méthane chez les bovins de boucherie

McKenny, D.J.
Tél. : 514-253-4232 x 280
Téléc. : 514-973-7098

Effets du travail classique et de conservation du sol avec ou sans irrigation souterraine ou drainage contrôlé sur les émissions de gaz à effet de serre dans les systèmes de production de maïs dans le sud-ouest de l'Ontario

Morrison, M.J.
Tél. : 613-759-1556
Téléc. : 613-952-6438
C.É. : Morrisonmj@em.agr.ca

Identification de cultivars de maïs et de soja dotés d'une tolérance à la pollution par l'ozone atmosphérique

Paul, R.J.
Tél. : 604-796-2221 x 215
Téléc. : 604-796-0359
C.É. : Paulj@em.agr.ca

Systèmes de gestion du fumier de porc et de bovin laitier et émissions d'oxyde nitreux et de méthane

Pattey, E. Tél. : 613-759-1523 Téléc. : 613-996-0646 C.É. : Patteye@em.agr.ca	Effets de la gestion agricole sur les émissions de gaz à effet de serre
Prevost, D. Tél. : 418-657-7980 x 239 Téléc. : 418-648-2402 C.É. : Prevostd@em.agr.ca	Mécanismes en jeu pendant l'émission de N_2O
Richards, J. Tél. : 709-772-4619 Téléc. : 709-772-6064 C.É. : Richardsj@em.agr.ca	Perte d'engrais et d'azote par dénitrification dans les sols podzoliques
Rochette, P. Tél. : 418-657-7980 Téléc. : 418-648-2402 C.É. : Rochettep@em.agr.ca	Effets des pratiques agricoles sur l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère
Runeckles, V.C. Tél. : 604-822-6829 Téléc. : 604-822-8640 C.É. : userapol@mtsg.ubc.ca	Effets de l'ozone sur les cultures de grands champs de la Vallée du Fraser
Schuepp, P.H. Tél. : 514-389-7935 Téléc. : 514-398-4853	Application à plus grande échelle de modèles simulant les émissions de gaz à effet de serre, en tenant compte des cartes d'utilisation des terres et des flux observés dans l'atmosphère
Selles, F. Tél. : 306-778-7245 Téléc. : 306-773-9123 C.É. : Selles@em.agr.ca	Comparaison des pratiques actuelles et futures de gestion des cultures relativement aux émissions de gaz à effet de serre dans les prairies semi-arides
Smith, W. Tél. : 613-256-7093 Téléc. : 613-996-0646 C.É. : smithw@comnet.ca	Modélisation des flux de CO_2 et de N_2O dans les agroécosystèmes du Canada

Tarnocai, C. Tél. : 613-759-1857 Téléc. : 613-759-1926 C.É. : Tarnocaict@em.agr.ca	Quantité de carbone organique dans les sols ccanadiens
Thurtell, G.W Tél. : 519-824-2453 Téléc. : 519-824-5730 C.É. : Gthurtell@lrs.uo.guelph.ca	Mesure des émissions de N_2O dans les sites agricoles de l'Ontario
Van Kessel, C. Tél. : 306-966-6854 Téléc. : 306-966-6881 C.É. : Vankessel@sask.usask.ca	Flux de CO_2 et de N_2O à l'échelle du paysage dans les Prairies
Zhu, T. Tél. : 613-759-1889 Téléc. : 613-996-0646 C.É. : Zhut@em.agr.ca	Amélioration des techniques de détermination du flux, basée sur la technique simplifiée d'accumulation de tourbillon
Grace, B. Tél. : 250-494-7711 Téléc. : 250-494-0755 C.É. : GraceB@em.agr.ca	Coordination du programme



